

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит два раза в квартал**

Научный журнал издается с января 2003 года

**Главный редактор В.А. Богущ**

**Редакционная коллегия:**

**Л.М. Лыньков** (зам. главного редактора),  
**А.Н. Осипов** (зам. главного редактора),  
**Т.В. Борботько** (ответственный секретарь),  
**М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,**  
**А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур**

**Редакционный совет:**

**И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,**  
**С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский,**  
**А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,**  
**С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,**  
**Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко,**  
**А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик**

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: [www.doklady.bsuir.by](http://www.doklady.bsuir.by)

E-mail: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

## СОДЕРЖАНИЕ

### *ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Кураев А.А., Матвеев В.В.</b> Многопучковой сферотрон .....	5
<b>Новикова А.А., Козел В.М., Ковалев К.А.</b> Исследование совокупной спектральной плотности сигналов в восходящем канале сети связи LTE .....	13
<b>Семёнов С.И., Липницкий В.А.</b> Автоморфизмы и орбиты ошибок кодов Рида – Соломона .....	20
<b>Кульша А.Ю., Климович М.А., Стержанов М.В., Теслюк В.Н., Егорова Н.Г.</b> Мехатронное устройство систем искусственного интеллекта .....	28
<b>Рыбак В.А., Рябычина О.П.</b> Система экологического мониторинга атмосферного воздуха .....	36
<b>Потараев В.В., Серебряная Л.В.</b> Автоматическое построение семантической сети для получения ответов на вопросы .....	44
<b>Сидоренко А.В., Солодухо Н.А.</b> Оценка депрессивного состояния оператора мобильных технических систем под воздействием электромагнитного шумового излучения .....	53

<b>Шашок В.Н., Коноплицкий А.С.</b> Методика определения структуры и параметров многополосных согласующих цепей на основе внутриволнового комплексного критерия соответствия идеальному фильтру .....	62
<b>Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А., Гайдук П.И.</b> Структура и морфология слоев $\text{CrSi}_2$ , сформированных при быстрой термообработке .....	71
<b>Котухов А.В., Гаврилюк В.С., Минчук В.С., Дежуннов Н.В.</b> Инновационный метод исследования акустической кавитации.....	80
<b>Железняк В.К., Лавров С.В., Барановский М.М., Филиппович А.Г.</b> Математическая модель каналов утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании .....	89
<b>Мордачев В.И.</b> Радиочастотное электромагнитное загрязнение может влиять на уровень смертности от COVID-19. 4G/5G/6G могут быть безопасными для людей .....	96

Корректурa текста на русском языке и верстка Л.В. КОНДАКОВА  
Корректурa текста на английском языке М.А. ПОЛКАНОВ  
Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 3

22.06.2020. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 20,21. Уч.-изд. л. 17,8. Тираж 100 экз. Заказ 395.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2020

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published twice quarterly**

The journal has been published since January, 2003

**Editor-In-Chief V. A. Bogush**

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, room 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: [www.doklady.bsuir.by](http://www.doklady.bsuir.by)

E-mail: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

## CONTENTS

*ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Kurayev A.A., Matveyenka V.V.</b> Multibeam spherotron .....	5
<b>Novikova A.A., Kozel V.M., Kavaliou K.A.</b> Research of the total spectral density of signals in the LTE up-link .....	13
<b>Semyonov S.I., Lipnitsky V.A.</b> The automorphisms and error orbits of Reed – Solomon codes .....	20
<b>Kulsha A.Y., Klimovich M.A., Sterjanov M.V., Tesluk V.N., Egorova N.G.</b> Mechatronic device of AI systems .....	28
<b>Rybak V.A., Ryabichina O.P.</b> Ecological monitoring system of the atmosphere .....	36
<b>Potaraev V.V., Serebryanaya L.V.</b> Automatic generation of semantic network for question answering .....	44
<b>Sidorenko A.V., Saladukha M.A.</b> Evaluation of the depressive state of mobile technical systems operator subjected to electromagnetic noise radiation .....	53
<b>Shashok V.N., Kanaplizki A.S.</b> Procedure of definition of structure and parameters of multi-band matching circuits on the basis of intracavitary complex criterion for conformity to the ideal filter .....	62
<b>Solovjov J.A., Pillipenko V.A., Gaiduk P.I.</b> Structure and morphology of CrSi <sub>2</sub> layers formed by rapid thermal treatment .....	71
<b>Kotukhov A.V., Gavrilyuk V.S., Minchuk V.S., Dezhkunov N.V.</b> Combined method for acoustic cavitation research .....	80

<b>Zheleznyak V.K., Lavrov S.V., Baranouski M.M., Filipovich A.G.</b> Mathematical model of speech signal leakage channels during discrete-quantified conversion.....	89
<b>Mordachev V.I.</b> COVID-19 lethality rate may be affected by electromagnetic radio frequency pollution. 4G/5G/6G can be safe for people .....	96



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-5-12>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.385.6

## МНОГОПУЧКОВОЙ СФЕРОТРОН

КУРАЕВ А.А., МАТВЕЕНКО В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 25 февраля 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Предложены два типа сферотрона-диотрона на двусферическом резонаторе (раннее в статье был предложен сферотрон-диотрон с несинхронным взаимодействием на двусферическом резонаторе, где электронный поток в этом генераторе проходит по оси  $z$  резонатора от внешней сферы до внутренней и взаимодействует с продольным (осевым) электрическим полем резонатора). Первый тип сферотрона имеет ряд электронных лучей (пучков), проходящих от внешней сферы резонатора к внутренней под углами  $\vartheta$  относительно оси  $z$  резонатора:  $\vartheta=0, \pi/8, \pi/4$ . Взаимодействие электронов с полем резонатора в нем осуществляется за счет возникновения квадратичных сил в возрастающем в направлении движения электронов поле. Во втором типе сферотрона (обращенном сферотроне) радиальные электронные пучки расположены по полудуге экваториальной плоскости резонатора, а электроны движутся от внутренней сферы к внешней. Взаимодействие в нем осуществляется из-за пространственной фазировки электронов. В обоих типах сферотронов достигим КПД 30 % при сверхбольшой мощности в импульсном режиме и суммарных токах пучков в десятки килоампер. Приведенные в статье данные свидетельствуют о перспективности многолучевого и обращенного сферотрона по следующим показателям: чрезвычайная простота конструкции; не требуется прецизионных решеток или гребенок с шагом, значительно меньшим длины волны; не требуются фокусирующие магнитные системы; обеспечивается электронный КПД 26...45 %. Заметим, что сферотрон – прибор большой мощности (10–100 МВт в импульсе длительностью 1–10 нс), поскольку для поддержания эффективности несинхронного взаимодействия нужна высокая величина напряженности электромагнитного поля, что достигается только при большой мощности прибора.

**Ключевые слова:** многопучковой генератор, двусферический резонатор, эффективность, несинхронное взаимодействие.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Кураев А.А., Матвеев В.В. Многопучковой сферотрон. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 5-12.

## MULTIBEAM SPHEROTRON

ALEXANDER. A. KURAYEV, VLADIMIR. V. MATVEYENKA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 25 February 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The article proposes two types of multibeam spherotron-diotron based on a two-spherical resonator (an early article suggested a spherotron-diotron with non-synchronous interaction on a bi-spherical resonator, where the electron beam in this generator passes along the resonator  $z$  axis from the outer sphere to the inner one and interacts with the longitudinal (axial) electric resonator field). The first spherotron type has electron beams going from outer to inner sphere with slope  $\vartheta$  about the  $z$ -axis:  $\vartheta=0, \pi/8, \pi/4$ . The electrons interact with the resonator field through the emergence of quadratic forces in the field increasing along the electron motion. The second type (inverted spherotron) has electron beams located in half arc of the equatorial resonator plane, and the electrons move from the inner sphere to the outside. The interaction in it is carried out due to the spatial electron phasing. Both spherotron types achieve efficiency of 30 % at ultra-high pulse power and tens of kiloampere of total beam currents. The data presented in the article indicate the prospects of broad application for the inverted spherotron by the following indicators: extreme ease of design; no precision gratings or combs are required with a step significantly shorter than the wavelength; no focusing magnetic systems are required; electronic efficiency from 26 to 45 % is ensured. Note that the spherotron is fundamentally a high-power device (10-100 MW in a 1-10ns pulse) for in order to maintain the efficiency of non-synchronous interaction, one needs a high strength of the electromagnetic field, which is achieved only with a high-power device.

**Keywords:** multibeam spherotron, two-spherical resonator, efficiency, non-synchronous interaction.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Multibeam spherotron. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 5-12.

### Введение

В статье [1] предложен сферотрон-диотрон с несинхронным взаимодействием [2] на двусферическом резонаторе. Электронный поток в этом генераторе проходит по оси  $z$  резонатора от внешней сферы до внутренней и взаимодействует с продольным (осевым) электрическим полем резонатора. В настоящей статье предложены два типа сферотрона-диотрона на двусферическом резонаторе. Первый тип сферотрона имеет ряд электронных лучей (пучков), проходящих от внешней сферы резонатора к внутренней под углами  $\vartheta$  относительно оси  $z$  резонатора:  $\vartheta=0, \pi/8, \pi/4$ . Взаимодействие электронов с полем резонатора в нем осуществляется за счет возникновения квадратичных сил в возрастающем в направлении движения электронов поле. Во втором типе сферотрона (обращенном сферотроне) радиальные электронные пучки расположены по полудуге экваториальной плоскости резонатора, а электроны движутся от внутренней сферы к внешней. Взаимодействие в нем осуществляется из-за пространственной фазировки электронов. В обоих типах сферотронов достигим КПД 30 % при сверхбольшой мощности в импульсном режиме и суммарных токах пучков в десятки килоампер. Такие токи необходимы для поддержания высокой интенсивности поля в резонаторе, необходимой для обеспечения эффективности несинхронного взаимодействия в сферотроне. С другой стороны, как показано в [1], в связи с отсутствием пространственной группировки при таком типе взаимодействия (т. е. электронные сгустки не формируются) допустимы очень большие токи на один электронный поток (до 20 кА, как показано в [1]).

### Поля в резонаторе, условия резонанса, релятивистские уравнения движения электронов

Поля колебаний типа  $E_{n10}$  двусферического резонатора могут быть записаны в сферической системе координат  $r, \vartheta, \varphi$  в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned} E_r &= E_n \cos \omega t \left( \frac{\cos r}{(r)^2} - \frac{\sin r}{(r)^3} \right) \cos \vartheta, \\ E_\vartheta &= \frac{E_n}{2} \cos \omega t \left( \frac{\sin r}{r} + \frac{\cos r}{(r)^2} - \frac{\sin r}{(r)^3} \right) \sin \vartheta, \\ H_\varphi &= -\frac{E_n}{2W^0} \sin \omega t \left( \frac{\cos r}{r} - \frac{\sin r}{(r)^2} \right) \sin \vartheta, \\ W^0 &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} - \text{волновое сопротивление вакуума.} \end{aligned} \quad (1)$$

Резонансные значения радиусов сфер резонатора  $a$  и  $b$  находятся из условия:  $E_\vartheta(a)=0$ ;  $E_\vartheta(b)=0$ . Или, используя (3):

$$\begin{aligned} \sin a + \frac{\cos a}{a} - \frac{\sin a}{(a)^2} &= 0, \\ \sin b + \frac{\cos b}{b} - \frac{\sin b}{(b)^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь приняты следующие безразмерные переменные:  $r = kr'$ ,  $a = ka'$ ,  $b = kb'$ ,  $r'$ ,  $a'$ ,  $b'$  – размерные величины;  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$ ;  $\lambda$ ,  $\omega$  – рабочая длина волны и угловая частота;  $c$  – скорость света в пустоте.

Для удобства расчетов преобразуем составляющие поля резонатора (2) из сферической системы координат  $r, \vartheta, \varphi$  в прямоугольную  $x, y, z$ :

$$\vec{E} = E_n \vec{e}, \quad H = \frac{E_n}{W^0} \vec{h}, \quad (3)$$

$$\text{где } e_x = (2F_1(r) + F_2(r)) \frac{x \cdot z}{r^2} \cos T,$$

$$e_y = (2F_1(r) + F_2(r)) \frac{y \cdot z}{r^2} \cos T,$$

$$e_z = \left( 2F_1(r) \frac{z^2}{r^2} - F_2(r) \frac{\rho^2}{r^2} \right) \cos T,$$

$$h_x = F_3(r) \frac{y}{r} \sin T, \quad h_y = -F_3(r) \frac{x}{r} \sin T,$$

$$F_1(r) = \frac{\cos r}{r^2} - \frac{\sin r}{r^3},$$

$$F_2(r) = \frac{\sin r}{r} + \frac{\cos r}{r^2} - \frac{\sin r}{r^3},$$

$$F_3(r) = \frac{\cos r}{r} - \frac{\sin r}{r^2},$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad x = kx', \quad y = ky', \quad z = kz', \quad T = \omega t.$$

Уравнение движения релятивистского электрона в безразмерных переменных имеет вид

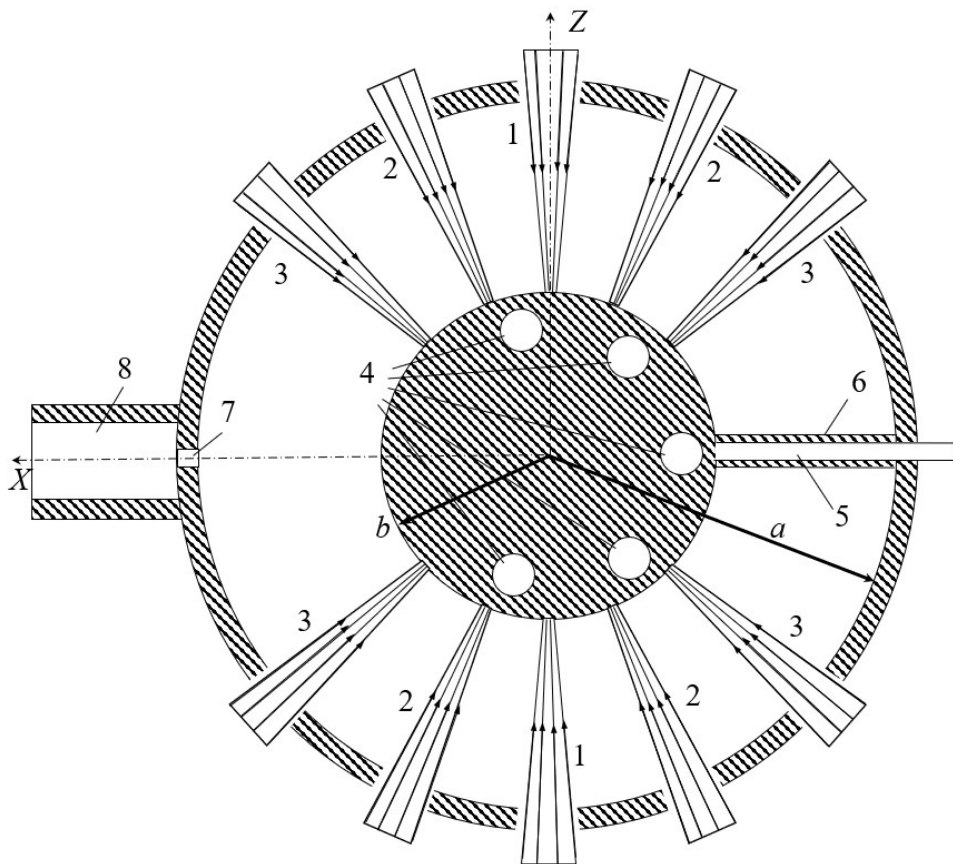
$$\begin{cases} \frac{d\vec{\beta}}{dT} = -A_n \sqrt{1-\beta^2} (\vec{e} + [\vec{\beta}, \vec{h}] - \vec{\beta}(\vec{\beta}, \vec{e})) \\ \frac{d\vec{r}}{dT} = \vec{\beta}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $\vec{\beta} = \vec{v} / c = \vec{v} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ ,  $A_n = \frac{E_n e}{m_0 c \omega}$ ,  $e$ ,  $m_0$  – соответственно заряд и масса покоя в системе  $x$ ,  $y$ ,  $z$  электрона.

Начальные условия к системе (2) задаются как  $\vec{r}_i(0) = \vec{r}_0$ ,  $\vec{\beta}_i(0) = \vec{\beta}_0$ ,  $T_i(0) = 2\pi i / N$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $i$  – номер электрона,  $N$  – число электронов в ансамбле.

### Сферотрон первого типа

Конструкция этого сферотрона приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема многопучкового сферотрона  
**Fig. 1.** Multi-beam spherotron scheme

Здесь 1 – электронный луч типа 1 ( $\vartheta=0$ ); 2 – электронные лучи типа 2, расположенные по окружности  $\varphi=0\dots 2\pi$  при ( $\vartheta=\pi/8$ ); 3 – электронные лучи типа 3, расположенные по окружности  $\varphi=0\dots 2\pi$  при  $\vartheta=\pi/4$ ; 4 – вход в систему охлаждения; 5 – экваториальная металлическая полуплоскость, стабилизирующая колебание  $E_{n10}$  резонатора и содержащая канал водяной системы охлаждения 6; 7 – азимутальная щель связи с выходным волноводом (или рупором) 8;  $a$  – безразмерный внутренний радиус внешней сферы;  $b$  – безразмерный внешний радиус внутренней сферы резонатора.



## Результаты расчетов

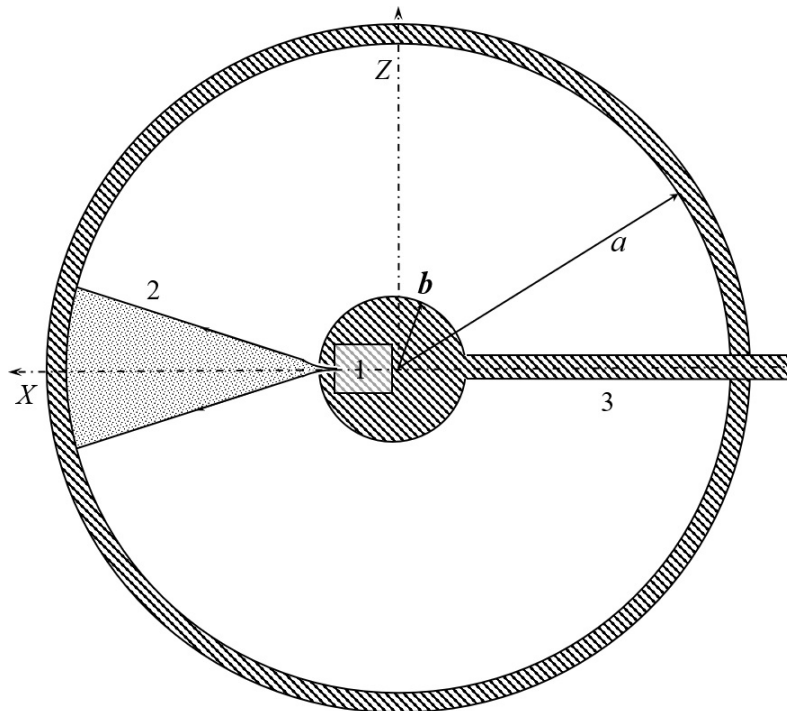
Вариант 1. Мода резонатора  $E_{110}$  ( $n=1$ );  $b=2,7437$ ,  $a=6,1168$ .  $A=1,0$ . Для всех лучей 1, 2, 3 типов  $\beta_0=0,29$ . Для лучей типа 1  $\eta_e=0,32$ , для типа 2 ( $\vartheta=\pi/8$ ) –  $\eta_e=0,31$ , для типа 3 ( $\vartheta=\pi/4$ ) –  $\eta_e=0,23$ .

Вариант 2. Колебание резонатора  $E_{710}$  ( $n=7$ );  $b=2,7437$ ,  $a=25,0928$ .  $A=0,45$ . Для лучей типа 1  $\beta_0=0,1375$ ,  $\eta_e=0,26$ , типа 2 –  $\beta_0=0,1375$ ,  $\eta_e=0,26$ , для типа 3 –  $\beta_0=0,1025$ ,  $\eta_e=0,22$ .

Траекторный анализ движения электронов для лучей трех типов показал, что характер взаимодействия для всех из них подобен первому типу. Он достаточно подробно проанализирован в [1], так что повторять выводы статьи [1] нет смысла – характер взаимодействия типичен для несинхронного, пространственных сгустков (фазовых пакетов) электронов не создается.

## Сферотрон второго типа (обращенный сферотрон)

Для реализации режима положительной отдачи энергии электромагнитному полю пучками, расположенными в экваториальной плоскости двусферического резонатора, необходимо направление движения электронов пучков от внутренней сферы резонатора к внешней. Такое условие реализуется в обращенном сферотроне, схема которого изображена на рис. 2. Здесь 1 – электронная пушка радиального электронного пучка, 2 – промодулированный в поле резонатора электронный пучок, 3 – полуплоскость, фиксирующая внутреннюю сферу и одновременно осуществляющая селекцию рабочей моды  $E_{n10}$ . Через нее также проходят линии электропитания пушек электронных пучков. Электронные пучки имеют начальное цилиндрическое сечение и располагаются по полудуге экваториальной плоскости.



**Рис. 2.** Схема обращенного сферотрона: 1 – электронная пушка радиального пучка; 2 – динамическое сечение пучка; 3 – металлическая экваториальная полуплоскость

**Fig. 2.** Inverted spherotron scheme: 1 – radial beam electron gun; 2 – dynamic beam section; 3 – metal equatorial half-plane

На рис. 3 приведены зоны генерации обращенного сферотрона в координатах  $A_0$ ,  $\beta_0$  для колебания  $E_{110}$ . Цифры на графике означают КПД на соответствующих линиях уровня зон. Видно, что требуемая амплитуда  $A_0$  в начальных зонах существенно меньше, чем в обычном сферотроне.

На рис. 4 приведены 16 траекторий электронов пучка при  $\beta_0=0,12$ ,  $A_0=0,9$  в плоскости  $X, Z$ . Эти данные весьма информативны для пояснения механизма взаимодействия электронов с электромагнитным полем в обращенном сферотроне. За счет отклоняющего действия поперечных составляющих сил поля, включая магнитные, электроны получают пространственную фазировку в электрическом поле таким образом, что попадают в тормозящую фазу поля.

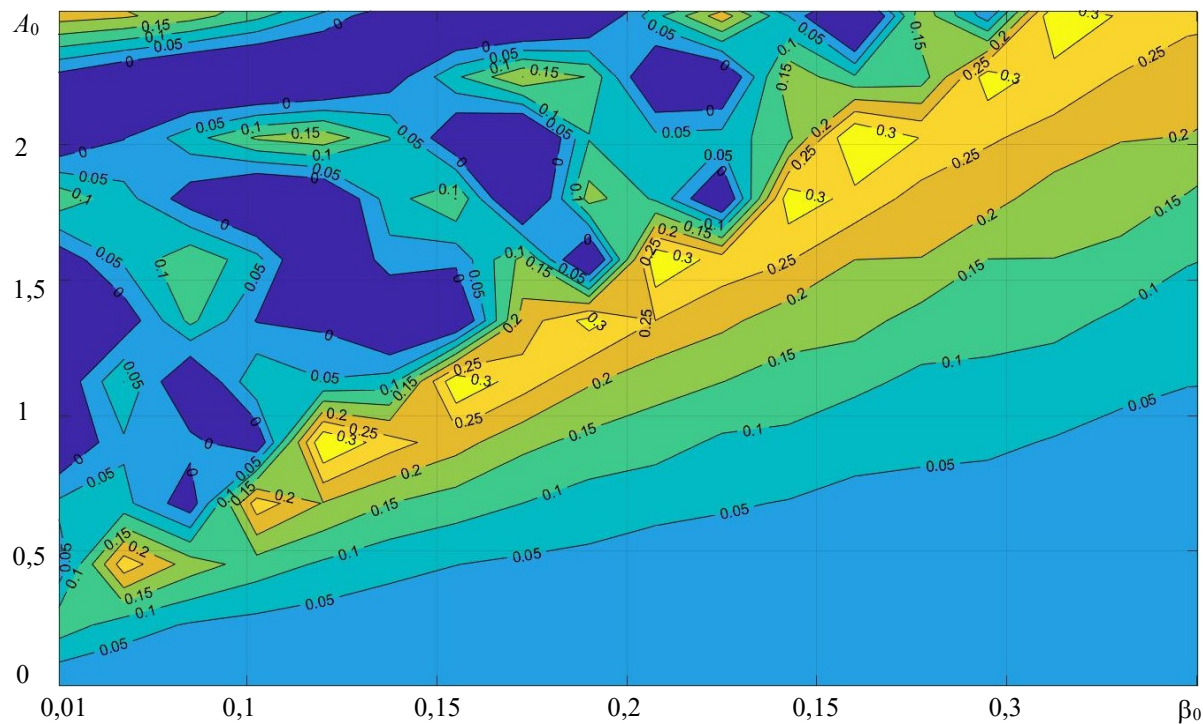


Рис. 3. Зоны для  $E_{110}$   
Fig. 3. The zones for  $E_{110}$

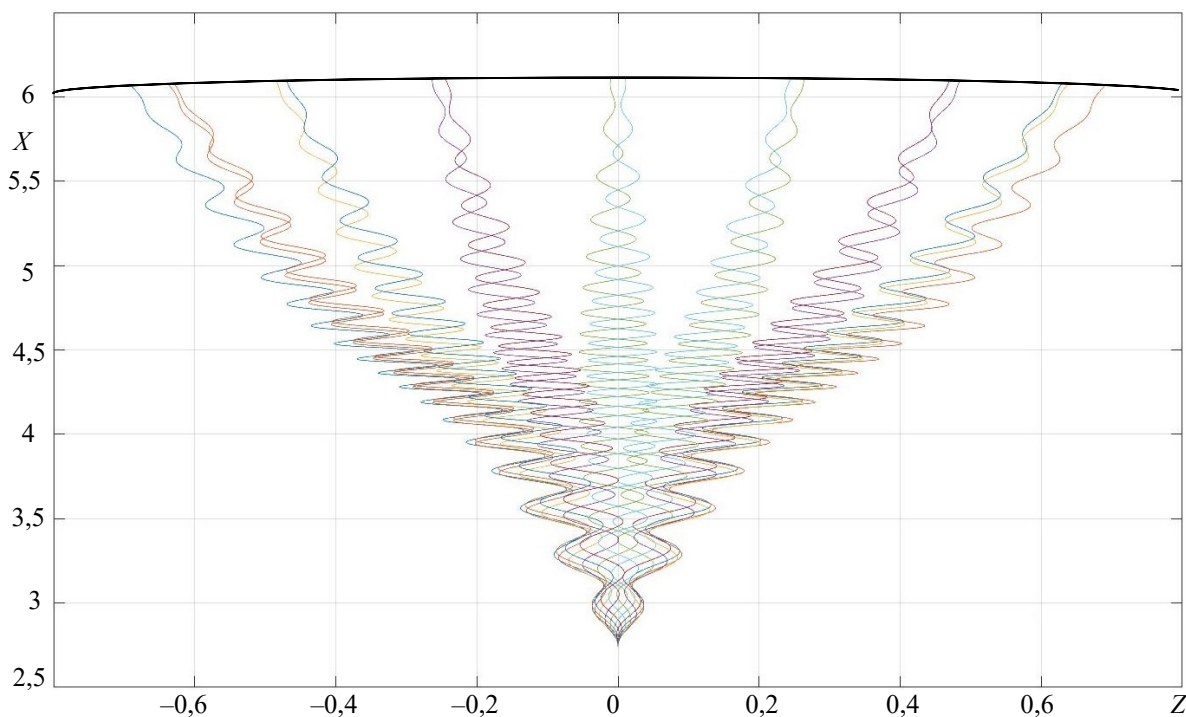


Рис. 4. Траектории электронов при  $\beta_0=0,12$ ,  $A_0=0,9$ ,  $E_{110}$   
Fig. 4. The electron paths at  $\beta_0=0,12$ ,  $A_0=0,9$ ,  $E_{110}$

При этом основная часть электронов отдает энергию полю, что иллюстрирует рис. 5, где приведены средний КПД ( $\eta_{cp}$ ) и КПД индивидуальных электронов как функция  $T$ . В результате в приведенном варианте достигается  $\eta_{cp}=36\%$ .

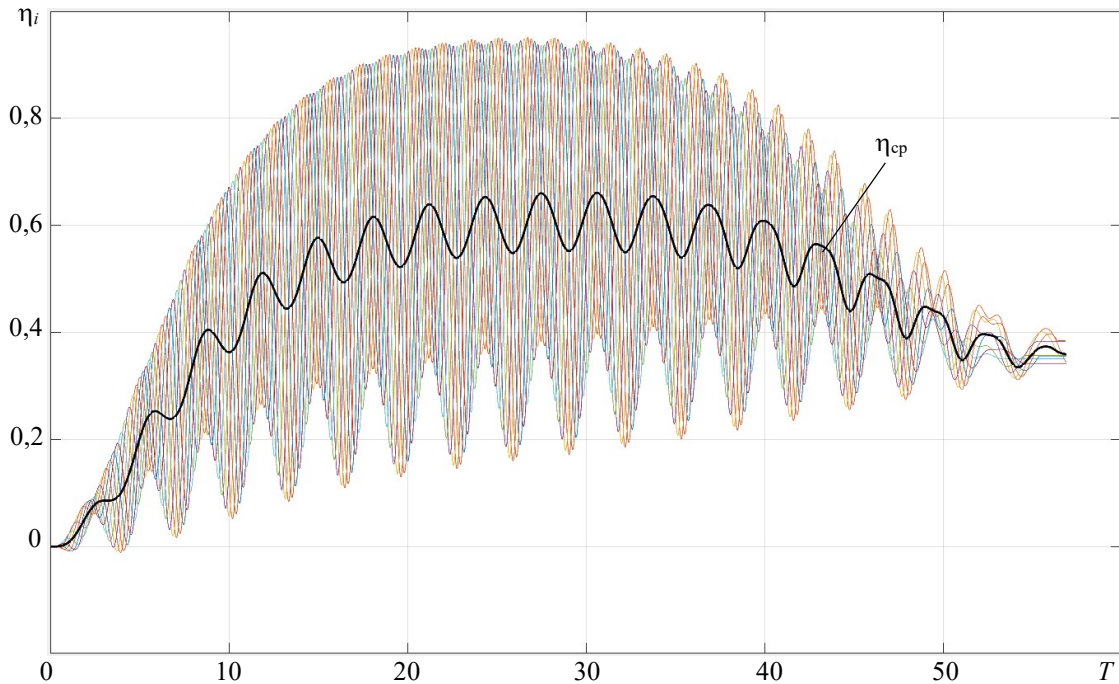


Рис. 5.  $\eta_i(T)$ ,  $\eta_{cp}(T)$  при  $\beta_0=0,12$ ,  $A_0=0,9$ ,  $E_{110}$

Fig. 5.  $\eta_i(T)$ ,  $\eta_{cp}(T)$  at  $\beta_0=0,12$ ,  $A_0=0,9$ ,  $E_{110}$

Таким образом, механизмы взаимодействия в обычном сферотроне и обращенном не имеют ничего общего: в первом механизм определяют квадратичные силы Миллера, во втором – пространственная фазировка электронов.

Следует указать на следующую возможность: рассматриваемая конструкция обращенного сферотрона может быть преобразована из диотрона в диод. В этом случае электронная пушка отсутствует; вместо нее в экваториальной плоскости внутренней сферы расположен катод в виде полудуги, а между внешней и внутренней сферой приложено напряжение  $U_a$ . Предварительные расчеты дали следующий результат:

$$\text{Мода резонатора } E_{110}; A_0=0,3; A_1 = \frac{eU_a}{m_0c^2} \left( \frac{ab}{a-b} \right), A_1=0,01 (U_a \approx 1 \text{ кВ}); \eta_e=0,14.$$

### Заключение

Приведенные в статье данные свидетельствуют о перспективности многолучевого и обращенного сферотрона по следующим показателям:

- чрезвычайная простота конструкции, не требуется прецизионных решеток или гребенок с шагом, значительно меньшим длины волны;
- не требуются фокусирующие магнитные системы;
- обеспечивается электронный КПД 26...45 %.

Заметим, что сферотрон – принципиально прибор большой мощности (10–100 МВт в импульсе длительностью 1–10 нс), поскольку для поддержания эффективности несинхронного взаимодействия нужна высокая величина напряженности электромагнитного поля, что достигается только при большой мощности прибора.

### Список литературы

1. Кураев А.А., Матвеев В.В. Терагерцовый генератор – сферотрон. *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018;1:389-399.
2. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Сеницын А.К. Несинхронные взаимодействия. *Успехи физических наук*. 2007;177:511-534.
3. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Москва: «ИНФРА-М»; 2016.

### References

1. Kurayev A.A., Matveyenko V.V. [Teragertsovyy generator – sferotron]. *Infokommunikatsionnyye i radioelektronnyye tekhnologii = Infocommunications and Radio Technologies*. 2018;1:389-399. (In Russ.)
2. Kravchenko V.F., Kurayev A.A., Sinityn A.K. [Nesinkhronnyye vzaimodeystviya]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*. 2007;177:511-534. (In Russ.)
3. Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinityn A.K. [*Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln*]. Moscow: «INFRA-M»; 2016. (In Russ.)

### Сведения о вкладе авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

### Author contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеев В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci., Professor, Professor of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Matveyenko V.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computational Methods and Programming Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293- 89-56;  
e-mail: kurayev@bsuir.by  
Кураев Александр Александрович

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293- 89-56;  
e-mail: kurayev@bsuir.by  
Kurayev Alexander Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-13-19>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.391

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОВОКУПНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ СИГНАЛОВ В ВОСХОДЯЩЕМ КАНАЛЕ СЕТИ СВЯЗИ LTE

НОВИКОВА А.А., КОЗЕЛ В.М., КОВАЛЕВ К.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 3 июня 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Статья посвящена анализу совокупной спектральной плотности излучения абонентских терминалов сети связи LTE. В сети связи LTE для нисходящей линии связи (downlink) применяется технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA), а для восходящей линии связи (uplink) – технология множественного доступа с частотным разделением каналов и одной несущей (SC-FDMA). В нисходящей линии связи занимаемая полоса радиочастот определяется количеством ресурсных блоков и величиной шага размещения поднесущих колебаний в частотной области. Особенности используемых технологий организации множественного доступа в сетях связи LTE определяют характер спектральной плотности совокупного радиосигнала. Так, в нисходящей линии связи спектральная плотность приближается к равномерной, поскольку распределение мощности в спектральной области не зависит от количества и местоположения ресурсных блоков, выделяемых абоненту, а также не зависит от территориального расположения самого абонента. Для восходящей линии связи определение характеристик спектральной плотности не так однозначно, так как они зависят от ряда факторов (параметров трафика, характера радиоусловий и др.). Для проведения подробного анализа спектральной плотности излучения совокупности абонентских терминалов сети связи LTE была разработана схема измерительной установки и проведены экспериментальные исследования спектральной плотности на базе научно-исследовательской лаборатории БГУИР. В статье приводятся спектрограммы совокупности сигналов в восходящей линии сети связи LTE, полученные для различных интервалов времени и различных мест наблюдения. Сделано заключение о возможности использования эквивалентной равномерной спектральной плотности для описания помеховых воздействий от группировок абонентских терминалов сетей связи LTE.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, помеховое воздействие, спектральная плотность, LTE, OFDMA, SC-FDMA.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Новикова А.А., Козел В.М., Ковалев К.А. Исследование совокупной спектральной плотности сигналов в восходящем канале сети связи LTE. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 13-19.

## RESEARCH OF THE TOTAL SPECTRAL DENSITY OF SIGNALS IN THE LTE UP-LINK

ANNA A. NOVIKOVA, VICTOR M. KOZEL, KONSTANTIN A. KAVALIYOU

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 3 June 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** This article is devoted to the analysis of the total spectral radiation density of LTE subscriber terminals. The LTE network uses orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) technology for downlink communications, and multiple access technology with single-carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) for uplink communications. In a downlink, the occupied radio frequency band is determined by the number of resource blocks and the size of the step of placement of subcarrier oscillations in the frequency domain. Features of the technologies used for organizing multiple access in LTE networks determine the nature of the spectral density of the total radio signal. Thus, in a downlink, the spectral density approaches uniformity, since the power distribution in the spectral region does not depend on the number and location of resource blocks allocated to the subscriber, and also does not depend on the territorial location of the subscriber itself. For an uplink, the determination of spectral density characteristics is not so unambiguous, since they depend on a number of factors (traffic parameters, the nature of radio conditions, etc.). To conduct a detailed analysis of the spectral radiation density of a set of LTE subscriber terminals, a scheme of the measuring unit was developed and experimental studies of the spectral density were conducted on the basis of the BSUIR research laboratory. The article presents spectrograms of a set of signals in the uplink of the LTE communication network, obtained for different time intervals and different places of observation. The conclusion is made about the possibility of using an equivalent uniform spectral density to describe interference effects from groupings of subscriber terminals of LTE communication networks.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, interference influence, spectral density, LTE, OFDMA, SC-FDMA.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Novikova A.A., Kozel V.M., Kavaliyou K.A. Research of the total spectral density of signals in the LTE up-link. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 13-19.

### Введение

Согласно таблице распределения частот наиболее перспективные для развития сетей сотовой подвижной электросвязи полосы радиочастот совместно используются как радиоэлектронными средствами (РЭС) подвижной службы гражданского назначения, так и РЭС других радиослужб, в частности фиксированной, радиолокационной, радионавигационной и др. Особенности организации восходящего канала связи в сетях LTE предполагают динамическое во времени изменение параметров (рабочая частота, мощность, ширина полосы частот и др.) радиосигнала абонентского терминала в процессе сеанса связи. Данная особенность формирования восходящего канала значительно усложняет решение задачи обеспечения межсистемной электромагнитной совместимости группировки абонентских терминалов LTE со сторонними РЭС. В связи с этим исследования совокупности излучений, присутствующих в восходящем канале LTE, с целью получения простых эквивалентных моделей являются достаточно актуальными.

### Методика проведения эксперимента

Сигнал нисходящей линии формируется на базе технологии OFDM. В спектральной области данный сигнал представляет совокупность ресурсных блоков, каждый из которых использует 12 синхронных (каждая поднесущая содержит целое число периодов, приходящихся

на длительность OFDM символа) поднесущих колебаний. Информационная нагрузка накладывается на сигнал-носитель с использованием низкоскоростной манипуляции поднесущих различными модуляционными схемами (BPSK, QPSK, 16QAM ... 256QAM и др.). Таким образом, занимаемая сигналом нисходящей линии полоса частот определяется количеством ресурсных блоков и величиной шага размещения поднесущих колебаний в частотной области [1].

В табл. 1 приведены данные для различных возможных конфигураций используемого радиоинтерфейса<sup>1</sup> в сетях связи четвертого поколения.

**Таблица 1.** Конфигурации используемого радиоинтерфейса в сетях связи четвертого поколения (шаг поднесущих 15кГц)

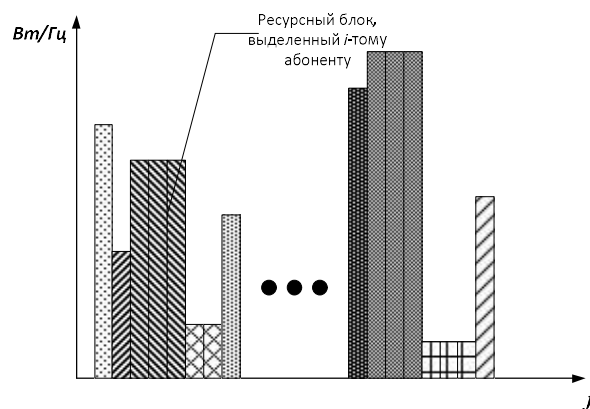
**Table 1.** Transmission bandwidth configuration  $N_{RB}$  in E-ULTRA channel bandwidths

Ширина полосы канала, МГц Transmission bandwidth	20	1,4	3	5	10	15
Количество ресурсных блоков Number resource blocks	100	6	15	25	50	75

Сигнал восходящей линии формируется с использованием SC-FDMA, позволяющей осуществлять синхронизацию сигналов, передаваемых абонентским оборудованием, одним, общим для всех абонентов опорным колебанием [2].

В зависимости от параметров трафика, характера радиоусловий (уровня внешнего шума, селективных и неселективных замираний, доплеровского сдвига и пр.) приема и настроек системы абоненту динамически выделяется от одного до всех возможных ресурсных блоков с изменяющимся расположением выделенного ресурса в частотной области в пределах используемого радиоканала.

Особенности используемых технологий организации множественного доступа в сетях подвижной связи четвертого поколения определяют характер спектральной плотности совокупного радиосигнала. Так, в нисходящем канале спектральная плотность приближается к равномерной, поскольку распределение мощности в спектральной области не зависит от количества и местоположения ресурсных блоков, выделяемых абоненту, а также не зависит от территориального расположения самого абонента. В восходящем канале подобная равномерность спектральной плотности сигнала не очевидна. Это в первую очередь обусловлено процедурами регулировки мощности абонентских терминалов в зависимости от радиоусловий в местах их расположения с целью «выравнивания» спектральной плотности совокупного сигнала от группировки абонентских станций в месте расположения приемной антенны базовой станции. Данное обстоятельство, совместно с изменением количества и местоположения выделенного конкретному абоненту в конкретный момент времени ресурса группового канала, приводит к существенным колебаниям спектральной плотности восходящего сигнала во времени [3]. Схематично подобная неравномерность иллюстрируется на рис. 1.



**Рис. 1.** Спектральная плотность мощности совокупного сигнала от группировки абонентских станций  
**Fig.1.** Spectral power density of the aggregate signal from the mobile stations

<sup>1</sup> 3GPP TS 36.101 v8.11.0 (2010-10): Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. (Release 8).

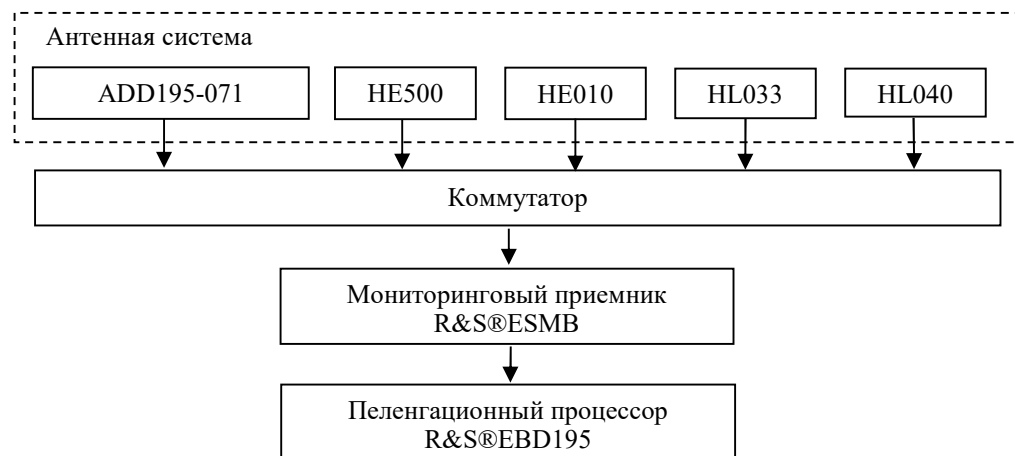
Нестационарность на интервалах времени, соизмеримых с длительностью OFDM символа спектральной плотности мощности совокупного радиосигнала восходящей линии, не позволяет определить так называемое частотно-зависимое подавление<sup>2</sup> мешающего сигнала в приемном тракте рецептора помех (РЭС других радиослужб, функционирующих в совмещенных и/или прилегающих полосах частот совместно с сетями подвижной связи четвертого поколения), требуемое для анализа условий электромагнитной совместимости.

### Результаты и их обсуждение

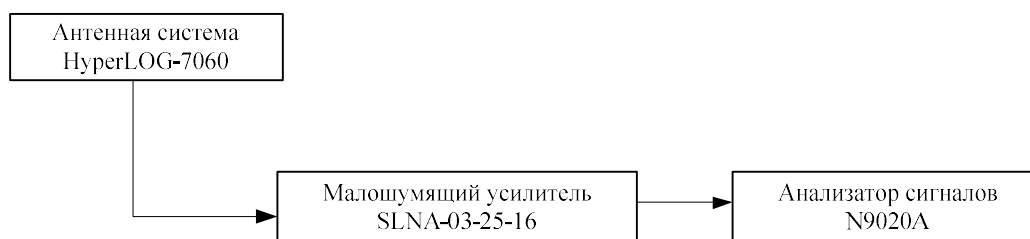
Эксперимент проводился в полосе радиочастот 1710–1740 МГц на базе центра радиоконтроля РУП «БелГИЭ» и НИЛ 1.12 БГУИР (см. табл. 2). Схемы измерительных установок представлены на рис. 2, 3.

**Таблица 2.** Координаты мест наблюдения электромагнитной обстановки  
**Table 2.** Coordinates of places of observation of electromagnetic environment

№ точки № point	Координаты мест наблюдения (г. Минск) Coordinates of places of observation		Высота подвеса антенны, м Antenna suspension height, m
1	53°48'04,2	27°27'38,1	72
2	53°55'4	27°35'42	12



**Рис. 2.** Схема измерительной установки на базе центра радиоконтроля РУП «БелГИЭ»  
**Fig. 2.** Diagram of the measuring setup based on the “BelGIE”

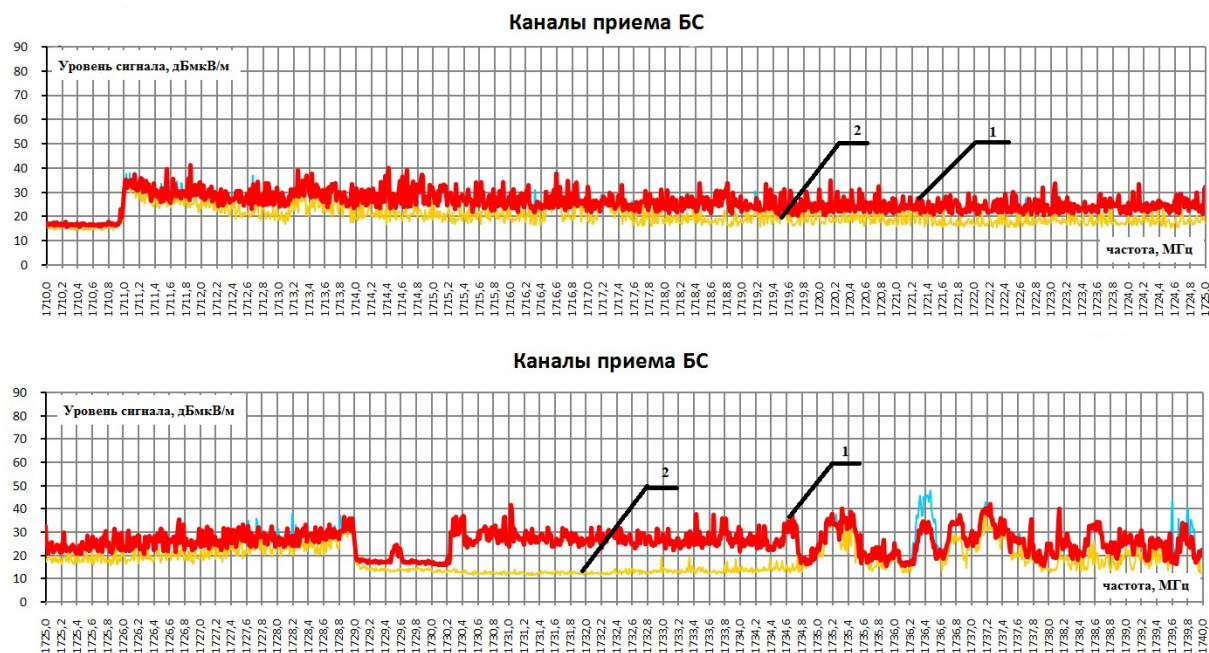


**Рис. 3.** Схема измерительной установки на базе НИЛ  
**Fig. 3.** Diagram of the measuring setup based on the research laboratory

Амплитудный спектр напряженности электромагнитного поля в восходящем канале сети LTE, полученный в точке наблюдения 1 в режиме удержания максимальных значений, приведен на рис. 4. Линией 1 на рис. 4 обозначены результаты наблюдений, полученные в результате мониторинга за первый квартал 2019 года, линией 2 – за второй квартал 2019 года.

<sup>2</sup> Рекомендация МСЭ-R SM.337-5 Частотный и территориальный разнос.

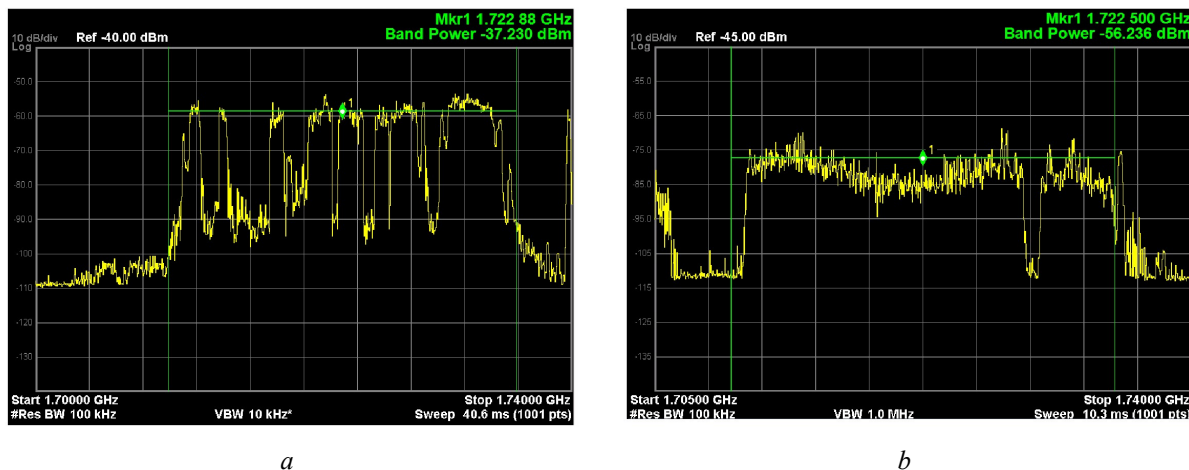




**Рис. 4.** Амплитудный спектр напряженности электромагнитного поля в восходящем канале сети LTE, полученный в точке наблюдения 1

**Fig. 4.** The amplitude spectrum of the electromagnetic field strength in the uplink of the LTE network obtained at the observation point 1

На рис. 5 представлены спектры мощности принимаемого сигнала в восходящем канале сети LTE, полученные в точке наблюдения 2 в режиме удержания максимальных значений, для различных интервалов наблюдения: 5 мин (рис. 5, *a*) и 120 мин (рис. 5, *b*).



**Рис. 5.** Спектры мощности принимаемого сигнала в восходящем канале сети LTE, полученные в точке наблюдения 2, для интервалов наблюдения 5 мин (*a*) и 120 мин (*b*)

**Fig. 5.** The power spectra of the received signal in the uplink of the LTE network obtained at the observation point 2 for observation intervals of 5 min (*a*) and 120 min (*b*)

Характер зависимости, приведенной на рис 5, *a*, подтверждает неравномерность мгновенной (определяемой на достаточно коротких интервалах времени) спектральной плотности совокупности сигналов абонентских терминалов в восходящем канале. Вместе с тем зависимости, приведенные на рис. 4 и 5, *б*, характеризуют спектральную плотность совокупного сигнала в восходящем канале как равномерную при значительных временных интервалах ее оценивания.

### Заключение

В результате проведенных исследований с учетом специфики формирования восходящего канала в сетях связи LTE для решения задачи обеспечения электромагнитной совместимости абонентского оборудования сети связи LTE с РЭС других служб и назначений может быть предложена упрощенная модель спектральной плотности группового сигнала абонентских терминалов сети связи LTE в восходящей линии в виде равномерной спектральной плотности мощности с параметрами:

– с шириной полосы, определяемой количеством используемых ресурсных блоков, количеством и шагом поднесущих в одном ресурсном блоке;

– уровнем, определяемым максимальной мощностью одного абонентского терминала, минимальным выделяемым одному абонентскому терминалу спектральным ресурсом (два ресурсных блока), потерями на трассе распространения от терминала к РЭС рецептору помех (абонентский терминал располагается на краю зоны обслуживания базовой станции LTE, ближайшей к месту размещения РЭС рецептора помех, или в месте расположения базовой станции).

Результаты работы могут быть использованы при разработке методики анализа условий электромагнитной совместимости группировки абонентских терминалов сетей четвертого поколения с РЭС других служб.

### Список литературы

1. Muhanned Al-Rawi. Performance analysis of OFDMA and SC-FDMA. *Visnyk NT UU KPI Seria Radiotekhnika Radioaparabuduvannia*. 2017. DOI: 10.1556/1848.2017.8.2.2.
2. Tae-Won Yune, Chan-Ho Choi, Gi-Hong Im, Jong-Bu Lim, Eung-Sun Kim, Yoon-Chae Cheong, Ki-Ho Kim. SC-FDMA with iterative multiuser detection: improvements on power/spectral efficiency. *IEEE Communications Magazine*. 2010. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5434389.
3. Козел В.М., Ковалев К.А. Определение уровня совокупной помехи от группировки мобильных станций стандарта LTE. *21-я международная конференция в Крыму «Микроволновые и телекоммуникационные технологии»*, Севастополь, Крым, Украина. 2011: 368-369.

### References

1. Muhanned Al-Rawi. Performance analysis of OFDMA and SC-FDMA. *Visnyk NT UU KPI Seria Radiotekhnika Radioaparabuduvannia*. 2017. DOI: 10.1556/1848.2017.8.2.2.
2. Tae-Won Yune, Chan-Ho Choi, Gi-Hong Im, Jong-Bu Lim, Eung-Sun Kim, Yoon-Chae Cheong, Ki-Ho Kim. SC-FDMA with iterative multiuser detection: improvements on power/spectral efficiency. *IEEE Communications Magazine*. 2010. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5434389.
3. Kozel V.M., Kavaliou K.A. [Level estimation of the cumulative interference from the group of the LTE mobile station]. *Proceeding of the 21<sup>st</sup> Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*, Sevastopol, Crimea, Ukraine. 2011: 368-369. (In Ukr.)

### Вклад авторов

Новикова А.А. выполнила измерения спектральной мощности в восходящем канале сети LTE, описала полученные результаты исследования.

Козел В.М. определил цель проведения исследования, поставил задачи, разработал схему измерительной установки.

Ковалев К.А. принял участие в проведении экспериментальных исследований.

### Authors' contribution

Novikova A.A. performed the measurement of the spectral power of the received signal in the uplink of the LTE network and described the results of study.

Kozel V.M. defined the purpose of the study, set the objectives and developed the diagram of the measuring setup.

Kavaliou K.A. participated in conducting experimental studies.

### **Сведения об авторах**

Новикова А.А., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Козел В.М., к.т.н, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ковалев К.А., старший научный сотрудник НИЛ «Телекоммуникационные устройства и системы» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-566-25-68;  
e-mail: annett.novikova@gmail.com  
Новикова Анна Алексеевна

### **Information about the authors**

Novikova A.A., PG student of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kozel V.M., PhD, Associate Professor of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kavaliou K.A., Senior Researcher R&D "Telecommunication systems and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-29-566-25-68;  
e-mail: annett.novikova@gmail.com  
Novikova Anna Alekseevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-20-27>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.056.55

## АВТОМОРФИЗМЫ И ОРБИТЫ ОШИБОК КОДОВ РИДА – СОЛОМОНА

СЕМЁНОВ С.И., ЛИПНИЦКИЙ В.А.

*Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 14 октября 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Цель работы, результаты которой представлены в рамках статьи, заключалась в развитии и переносе на класс кодов Рида – Соломона (РС-кодов) базовых положений теории норм синдромов (ТНС), разработанных ранее для активно применяемого в теории и практике помехоустойчивого кодирования класса кодов Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ-кодов). Для достижения поставленной цели осуществлен переход в изложении теории РС-кодов с полиномиального языка на матричный. Такой подход позволяет в полной мере использовать возможности теории полей Галуа. Главная сложность РС-кодов в том, что они опираются на недвоичный алфавит. Этот же фактор является привлекательным для практических применений РС-кодов. Матричный язык позволяет разбивать синдромы ошибок на компоненты, являющиеся элементами поля Галуа – поля определения РС-кодов. ТНС для БЧХ-кодов опирается на применение автоморфизмов этих кодов – циклических и циклотомических подстановок. В работе подробно изучены автоморфизмы РС-кодов. Циклическая подстановка относится к разрядам автоморфизмов РС-кодов и порождает подгруппу  $\Gamma$  порядка  $N$  (длина кода). Циклотомическая подстановка не принадлежит классу автоморфизмов РС-кодов – мощность алфавита, большая 2, препятствует этому. При расширении понятия автоморфизма кода за рамки перестановок координат векторов к автоморфизмам РС-кодов можно отнести и гомотетии, или аффинные подстановки, поскольку они также образуют циклическую группу  $A$  порядка  $N$ . Показано, что циклическая и аффинная подстановки коммутируют друг с другом, что, вообще говоря, не типично для линейных операторов и подстановок. Группа  $\Gamma$  циклических подстановок, группа  $A$  аффинных подстановок и объединенная  $AG$  группа порядка  $N^2$  порождают 3 вида орбит ошибок в РС-кодах. Изучено строение орбит ошибок относительно действия групп  $A$ ,  $\Gamma$  и объединенной группы  $AG$  {231 слово}.

**Ключевые слова:** линейный код, РС-код, синдромы ошибок, автоморфизмы кодов, циклическая подстановка, аффинная подстановка, орбиты векторов-ошибок, теория норм синдромов.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Семёнов С.И., Липницкий В.А. Автоморфизмы и орбиты ошибок кодов Рида – Соломона. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 20-27.

## AUTOMORPHISMS AND ERROR ORBITS OF REED – SOLOMON CODES

SERGEY I. SEMYONOV, VALERY A. LIPNITSKY

*Military academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 14 Oktober 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The purpose of this work with its results presented in the article was to develop and transfer to the class of Reed – Solomon codes (RS-codes) the basic provisions of the theory of syndrome norms (TNS), previously developed for the noise-resistant coding of the class of Bose – Chaudhuri – Hocquenghem codes (BCH-codes), which is actively used in theory and practice. To achieve this goal, a transition has been made in the interpretation of the theory of RS-codes from polynomial to matrix language. This approach allows you to fully use the capabilities of Galois field theory. The main difficulty of RS-codes is that they rely on a non-binary alphabet. The same factor is attractive for practical applications of RS-codes. The matrix language allows you to break the syndromes of errors into components that are elements of the Galois field – the field of definition of RS-codes. The TNS for BCH codes is based on the use of automorphisms of these codes – cyclic and cyclotomic substitutions. Automorphisms of RS-codes are studied in detail. The cyclic substitution belongs to the categories of automorphisms of RS-codes and generates a subgroup  $\Gamma$  of order  $N$  (code length). The cyclotomic substitution does not belong to the class of automorphisms of RS-codes – the power of the alphabet greater than 2 prevents this. When expanding the concept of automorphism of a code beyond substitutions of coordinates of vectors to automorphisms of RS-codes, homotheties or affine substitutions can be attributed, since they also form a cyclic group  $A$  of order  $N$ . It is shown that cyclic and affine substitutions commute with each other, which, generally speaking, is not typical for linear operators and substitutions. The group  $\Gamma$  of cyclic substitutions, the group  $A$  of affine substitutions, and the combined  $A\Gamma$  group of order  $N^2$  generate 3 types of error orbits in RS-codes. The structure of the orbits of errors with respect to the action of groups  $A$ ,  $\Gamma$  and the combined group  $A\Gamma$  is studied {231 words}.

**Keywords:** linear code, RS-code, error syndromes, automorphisms of codes, cyclic substitution, affine substitution, orbits of error vectors, theory of norms of syndromes.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Semyonov S.I., Lipnitsky V.A. The automorphisms and error orbits of Reed – Solomon codes. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 20-27.

### Введение

Одним и самым главным из средств повышения помехоустойчивости в цифровых системах передачи и обработки данных является использование помехоустойчивого кодирования. Среди массово применяемых линейных помехоустойчивых кодов следует отметить коды Рида – Соломона [1–4]. Эти коды нашли широкое применение в самых различных современных системах передачи и хранения информации [4].

Эффективному применению РС-кодов способствовали следующие их преимущества:

– алфавит не двоичный, что позволяет сделать компактной обработку РС-кода и работу с ним;

– благодаря мощности алфавита при относительно малых длинах спектр исправляемых ошибок весьма широк.

Определение РС-кодов близко к определению БЧХ-кодов. Однако разработанная для БЧХ-кодов теория норм синдромов, позволяющая широко и эффективно использовать теорию полей Галуа при их обработке, остается пока не развитой на класс РС-кодов. Именно разработке и развитию последнего вопроса и посвящена данная статья.

### Необходимые сведения о кодах Рида – Соломона

Коды Рида – Соломона – линейные блочные коды [5], обнаруживающие и исправляющие ошибки, которые возникают под влиянием помех в каналах передачи информации. В общем случае код Рида – Соломона представляет собой БЧХ-код длиной  $N = q - 1$  над полем Галуа  $GF(q)$  из  $q$  элементов, где  $q = p^m > 2$  для простого числа  $p$  и натурального  $m \geq 1$  [3]. Так как РС-коды являются линейными, то они обладают следующими важными свойствами: 1) сумма двух кодовых слов является кодовым словом; 2) произведение любого кодового слова на элемент поля Галуа также является кодовым словом.

Для работы применяют полиномиальный или матричный способы задания РС-кодов.

В первом случае РС-код задается с помощью порождающего многочлена вида  $g(x) = (x - \alpha^b)(x - \alpha^{b+1}) \dots (x - \alpha^{b+\delta-2})$ , где  $\alpha$  – примитивный элемент поля  $GF(q)$ ,  $b$  и  $\delta$  – фиксированные целые числа.

Кодирование осуществляется с помощью сдвига полинома сообщения  $m(X)$  в первые  $k$  разряды регистра кодового слова и прибавлением в крайние левые  $n - k$  разряды полинома четности  $p(x) = (X^{n-k} m(X)) \bmod g(X)$ .

Декодирование осуществляется с помощью вычисления синдромов ошибок и дальнейшим нахождением локатора и полинома ошибок на основании полученных значений синдромов по известным алгоритмам Питерсона – Горенштейна – Цирлера, Берлекэмп – Месси и алгоритму Форни [1, 4, 7].

Во втором случае кодирование осуществляется с помощью порождающей матрицы кода  $G$  по формуле  $\bar{c} = \bar{i} \cdot G$ , где  $\bar{i}$  – информационный вектор с  $K$  координатами.

Проверочная матрица РС-кода совпадает с матрицей  $H$  БЧХ-кода с элементами, принадлежащими полю  $GF(q)$ :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^b & \alpha^{2b} & \dots & \alpha^{(N-1)b} \\ 1 & \alpha^{b+1} & \alpha^{2(b+1)} & \dots & \alpha^{(N-1)(b+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \alpha^{b+\delta-2} & \alpha^{2(b+\delta-2)} & \dots & \alpha^{(N-1)(b+\delta-2)} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица имеет размерность  $(\delta - 1) \times N$  и ранг  $\delta - 1$  над полем  $GF(q)$ .

На практике, как правило, используют РС-коды с  $b=1$ . Тогда проверочная матрица (1) принимает вид

$$H = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 & \dots & \alpha^{N-1} \\ 1 & \alpha^2 & \alpha^4 & \dots & \alpha^{2(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \alpha^{\delta-1} & \alpha^{2(\delta-1)} & \dots & \alpha^{(N-1)(\delta-1)} \end{bmatrix} = [\alpha^i, \alpha^{2i}, \dots, \alpha^{(\delta-1)i}]^T. \quad (2)$$

Как можно заметить, проверочная матрица (1) задает циклический код с порождающим полиномом  $g(x) = (x - \alpha^b)(x - \alpha^{b+1}) \dots (x - \alpha^{b+\delta-2})$ .

РС-коды будем в дальнейшем обозначать через  $RS(N, K)$  [6], где  $N$  – длина РС-кода,  $K = N - \deg g(x) = N - \delta + 1$  – количество информационных символов, размерность кода. Минимальное расстояние РС-кода равно  $D = N - K + 1 = \delta$  ([1], с. 289).

### Векторы ошибок в РС-кодах

Векторы-ошибки в кодах  $RS(N, K) = RS(q - 1, q - \delta)$  принадлежат  $(q - 1)$ -мерному векторному пространству  $V_N(GF(q))$  над полем Галуа  $GF(q)$ . Поэтому в данном коде имеется: всего  $(q - 1)^2$  ошибок весом 1; двойных –  $C_{q-1}^2 \cdot (q - 1)^2$ ; ошибок весом  $\omega \geq 1$  –  $C_{q-1}^\omega \cdot (q - 1)^\omega$ ,

что в  $(q-1)^{\omega}$  раз больше, чем у двоичного БЧХ-кода той же длины. Как видим, с ростом  $N$  и  $\omega$  количество исправляемых РС-кодом ошибок стремительно растет. Конечно, появление векторов ошибок, вес которых больше минимального расстояния  $D$ , должно быть крайне маловероятным, иначе возникнут проблемы с работой ТКС. Все же векторы ошибок весом, меньшим  $D$ , обнаруживаемы кодом  $RS(N, K)$  и исправляемы, если их вес  $t \leq \frac{D-1}{2}$  для нечетных  $D$  и  $t \leq \frac{D-2}{2}$  – для четных значений  $D$ .

Декодирование ошибок весом, больше 1, при полиномиальном задании РС-кодов реализуется достаточно громоздкими процедурами, что достаточно ярко показали исследования в работе [7]. Теория норм синдромов продемонстрировала эффективность применения орбит ошибок в БЧХ-кодах. Построение аналогичной теории для РС-кодов еще предстоит и требует рассмотрения автоморфизмов этих кодов, имеющих, однако, определенную специфику.

### Автоморфизмы РС-кодов

Данное понятие в помехоустойчивом кодировании введено с сильной ориентацией на двоичные коды [1]. По сути, это перестановки координат векторов, переводящие все кодовые слова в кодовые. Первый, хорошо известный пример таких перестановок дает лемма 1.

**Лемма 1.** РС-код с проверочной матрицей (1) является циклическим, то есть оператор  $\sigma$ , действующий на каждый вектор  $\bar{e} = (e_1, e_2, \dots, e_N) \in V_N(GF(q))$  по правилу  $\sigma(\bar{e}) = (e_N, e_1, e_2, \dots, e_{N-1})$ , кодовые слова кода  $RS(N, K) = RS(q-1, q-\delta)$  преобразует в кодовые.

Доказательство повторяет обоснование аналогичного утверждения для БЧХ-кодов.

Повторное применение оператора  $\sigma$  порождает его степени  $\sigma^2, \sigma^3$  и т. д. Эти степени составляют циклическую группу  $\Gamma = \{\sigma, \sigma^2, \dots, \sigma^N = e\}$  порядка  $N$ . Здесь  $e$ , разумеется, есть тождественный оператор.

Однако следует признать, что полной аналогии с БЧХ-кодами здесь не наблюдается. К примеру, циклотомическая подстановка [1, 2] в циклических двоичных БЧХ-кодах, кодах Хемминга и реверсивных кодах – есть автоморфизм в названных кодах. Но из-за наличия ненулевых и неединичных координат у кодовых слов РС-кодов к автоморфизмам кодов  $RS(N, K)$  циклотомическая подстановка принадлежать не может.

Вспомним, что РС-коды принадлежат классу линейных кодов. Всякий же линейный  $(N, K)$ -код есть  $K$ -мерное подпространство в  $N$ -мерном линейном пространстве над полем определения кода. Одними из базовых понятий линейной алгебры являются понятия линейного оператора и линейного преобразования векторных пространств [8]. Линейные невырожденные преобразования векторных пространств – математический синоним автоморфизмов этих пространств.

Пусть  $GF(q)^*$  – мультипликативная группа поля  $GF(q)$ , то есть множество всех ненулевых элементов этого поля, образующих группу относительно операции умножения, причем группу циклическую [9, 10]. Естественный пример автоморфизмов кодов как невырожденных линейных операторов, не относящихся к классу перестановок координат векторов, предоставляет лемма 2.

**Лемма 2.** Преобразования  $f_{\gamma} : \bar{x} \rightarrow \gamma \bar{x}$   $(q-1)$ -мерного векторного пространства  $E_{q-1}$  над полем  $GF(q)$  – пространства ошибок кода  $RS(N, K) = RS(q-1, q-\delta)$  – являются невырожденными линейными преобразованиями этого пространства для всякого  $\gamma \in GF(q)^*$ , преобразуют кодовые слова кода  $RS(N, K)$  в кодовые слова этого же кода.

Доказательство первой части леммы очевидно. Если вектор  $\bar{x}$  принадлежит коду  $RS(N, K)$ , то для проверочной матрицы  $H$  этого кода  $\bar{x}H^T = \bar{0}$ . При этом  $f_\gamma(\bar{x}) \cdot H^T = (\gamma\bar{x})H^T = \gamma(\bar{x}H^T) = \gamma\bar{0}$ . Следовательно,  $f_\gamma(\bar{x})$  также принадлежит коду  $RS(N, K)$ .

Преобразования  $f_\gamma$  носят название гомотетий, или аффинных преобразований. Легко видеть, что они образуют группу относительно операции композиции отображений, изоморфную циклической группе  $GF(q)^*$  порядка  $q-1$ . Группу аффинных преобразований, в соответствии с их названием, будем обозначать символом  $A$ . В силу своей цикличности группа  $A$  имеет следующую структуру:  $A = \langle f_\alpha \rangle = \{f_\alpha, f_{\alpha^2}, \dots, f_{\alpha^{q-1}} = e\}$  для примитивного элемента  $\alpha$  поля  $GF(q)$ , образующей мультипликативной группы  $GF(q)^*$ .

Автоморфизмы любого линейного кода  $C$  образуют группу  $Aut C$  относительно операции композиции отображений. Группы  $\Gamma$  и  $A$  являются подгруппами группы  $Aut(RS(N, K))$ . Они не имеют общих элементов, за исключением тождественного оператора  $e$ . Имеет место следующее, довольно редкое для подстановок и линейных операторов свойство.

**Лемма 3.** Операторы  $f_\gamma$  и  $\sigma$  коммутируют друг с другом:  $\sigma f_\gamma = f_\gamma \sigma$ .

Доказательство. Для произвольного вектора  $\bar{e} = (e_1, e_2, \dots, e_N) \in V_N(GF(q))$  вектор  $f_\gamma(\sigma(\bar{e})) = (\gamma e_N, \gamma e_1, \gamma e_2, \dots, \gamma e_{N-1})$ , а вектор  $\sigma(f_\gamma(\bar{e})) = (\gamma e_N, \gamma e_1, \gamma e_2, \dots, \gamma e_{N-1}) = f_\gamma(\sigma(\bar{e}))$ , что и требовалось доказать.

В силу леммы 3 минимальная подгруппа группы  $Aut(RS(N, K))$ , содержащая подгруппы  $A$  и  $\Gamma$ , совпадает с их прямым произведением  $A\Gamma = \{f_\alpha^i \cdot \sigma^j \mid 0 \leq i \leq q-2; 0 \leq j \leq q-2\}$  и имеет порядок  $(q-1)^2$ .

### Орбиты ошибок в РС-кодах

Как предлагает теория норм синдромов [2], все векторы-ошибки в коде  $RS(N, K)$  будем распределять по небольшим попарно-непересекающимся множествам – орбитам. Если на множестве векторов-ошибок действует некоторая группа  $G$ , то  $G$ -орбита  $\langle \bar{e} \rangle_G$  представляет собой совокупность всех попарно различных векторов-ошибок  $g(\bar{e})$  для заданного фиксированного вектора-ошибки  $\bar{e}$  и всех элементов  $g \in G$ . Естественно, структура всякой  $G$ -орбиты существенно зависит от свойств, сложности и строения самой группы  $G$ .  $G$ -орбита называется полной, если ее мощность равна мощности группы  $G$ .

Так, для  $G = \Gamma$  имеем хорошо описанное для двоичных кодов в монографии [2] циклическое строение  $\Gamma$ -орбит:  $\langle \bar{e} \rangle_\Gamma = \{\bar{e}, \sigma(\bar{e}), \sigma^2(\bar{e}), \dots, \sigma^{v-1}(\bar{e})\}$ . Здесь  $v$  – наименьшее целое положительное число с условием  $\sigma^v(\bar{e}) = \bar{e}$ ; как правило,  $v = N$ , и в отдельных, редких случаях  $v$  является делителем  $N$ . При  $v = N$   $\Gamma$ -орбита содержит максимально возможное количество векторов и потому является полной.

Значение  $v < N$  возможно только в случае, когда вес вектора  $\bar{e}$  является делителем числа  $N$  при внутренней симметрии расположения ненулевых координат.

Пример 1. В пространстве  $V_{15}(GF(2^4))$  вектор  $\bar{e} = (\beta, 0, 0, 0, 0, \beta, 0, 0, 0, 0, \beta, 0, 0, 0, 0)$  с произвольной координатой  $\beta \in GF(2^4)^*$  порождает  $\Gamma$ -орбиту мощностью  $v = 5$ .

**Лемма 4.** Для каждого  $\beta \in GF(q)^*$  и всех степеней  $\alpha^i, 0 \leq i \leq q-2$ , примитивного элемента  $\alpha \in GF(q)$  справедливо неравенство  $\beta \cdot \alpha^i \neq \beta \cdot \alpha^j$  при  $0 \leq i < j \leq q-2$ .

Благодаря лемме 4, имеем следующую структуру  $A$ -орбит для всякого вектора  $\bar{e} \neq \bar{0}$ :  $\langle \bar{e} \rangle_A = \{\bar{e}, f_\alpha(\bar{e}), f_{\alpha^2}(\bar{e}), \dots, f_{\alpha^{q-1}}(\bar{e})\}$ . Все ненулевые  $A$ -орбиты являются полными.

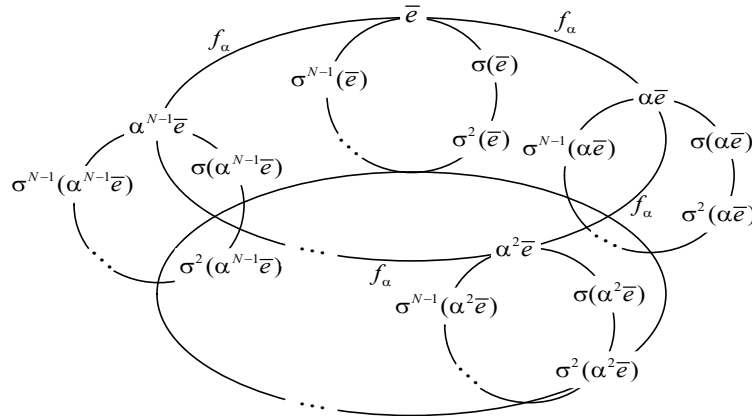


**Лемма 5.** Под действием оператора  $\sigma$  всякая А-орбита  $\langle \bar{e} \rangle_A$  преобразуется в А-орбиту  $\langle \sigma(\bar{e}) \rangle_A$ . Под действием оператора  $f_\gamma$  всякая  $\Gamma$ -орбита  $\langle \bar{e} \rangle_\Gamma$  преобразуется в  $\Gamma$ -орбиту  $\langle f_\gamma(\bar{e}) \rangle_\Gamma$ . Мощности  $\Gamma$ -орбит  $\langle \bar{e} \rangle_\Gamma$  и  $\langle f_\gamma(\bar{e}) \rangle_\Gamma$  совпадают.

Из леммы 5 вытекает строение АГ-орбит.

**Теорема 1.** Для каждого вектора  $\bar{e} \neq \bar{0}$  АГ-орбита  $\langle \bar{e} \rangle_{AG}$  состоит из  $v(q-1)$  векторов для  $v=N$  или для  $v$ , делящего  $N$ , и имеет следующую структуру:  $\langle \bar{e} \rangle_{AG} = \{ \langle \bar{e} \rangle_A, \langle \sigma(\bar{e}) \rangle_A, \dots, \langle \sigma^{v-1}(\bar{e}) \rangle_A \}$  или  $\langle \bar{e} \rangle_{AG} = \{ \langle \bar{e} \rangle_\Gamma, \langle (\alpha\bar{e}) \rangle_\Gamma, \dots, \langle (\alpha^{q-2}\bar{e}) \rangle_\Gamma \}$ .

В качестве примера представим на рис. 1 изображение полной АГ-орбиты векторов-ошибок в РС-коде длиной  $N$ .



**Рис. 1.** Схема полной АГ-орбиты в РС-коде длиной  $N$   
**Fig. 1.** Diagram of a complete АГ-orbit in a RS-code of length  $N$

Здесь малые овалы представляют собой  $\Gamma$ -орбиты, переходящие друг в друга под действием автоморфизма  $f_\alpha$  – умножения координат векторов на примитивный элемент  $\alpha$  поля Галуа  $GF(q)$ .

Пусть  $K$  – множество всех корректируемых кодом  $RS(N, K)$  векторов-ошибок мощностью  $|K|$ . Множество  $K$  разбивается на множества  $\Gamma$ -орбит  $K_\Gamma$ , А-орбит  $K_A$  и АГ-орбит  $K_{AG}$ . Очевидно,  $|K_A| = \frac{1}{q-1} \cdot |K|$ . Мощность  $K_\Gamma$  оценивается той же величиной

$|K_\Gamma| = \frac{1}{q-1} \cdot |K|$ . На деле  $|K_A|$  может оказаться несколько больше при наличии неполных

$\Gamma$ -орбит. Аналогично  $|K_{AG}|$  оценивается величиной  $|K_{AG}| = \frac{1}{(q-1)^2} \cdot |K|$ .

Далее, в данной работе конкретные вычисления будем проводить с кодами  $RS(N, K)$ , у которых  $b = 1, \delta = 5, q = 2^m, m > 1$ , а проверочная матрица имеет вид

$$H = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 & \dots & \alpha^{N-1} \\ 1 & \alpha^2 & \alpha^4 & \dots & \alpha^{2(N-1)} \\ 1 & \alpha^3 & \alpha^6 & \dots & \alpha^{3(N-1)} \\ 1 & \alpha^4 & \alpha^8 & \dots & \alpha^{4(N-1)} \end{bmatrix} = [\alpha^i, \alpha^{2i}, \alpha^{3i}, \alpha^{4i}]^T. \quad (3)$$

В этом коде множество  $K$  состоит из векторов-ошибок весом 1 и 2, общее количество которых  $|K| = (q-1)^2 + C_N^2 (q-1)^2 = (q-1)^2 (1 + C_N^2)$ . Следовательно,  $|K_A| = (q-1)(1 + C_N^2)$ . Поскольку  $N = q-1$  нечетно, то все  $\Gamma$ -орбиты двойных ошибок являются полными, а потому

$|K_{\Gamma}| = (q-1)(1+C_N^2)$ . Все ошибки весом 1 образуют, очевидно, одну полную АГ-орбиту. Двойные ошибки также делятся на полные АГ-орбиты. Поэтому  $|K_{AG}| = 1 + C_N^2$ . В частности, при  $N = 7$   $|K| = 1078$ ,  $|K_A| = |K_{\Gamma}| = 154$ ,  $|K_{AG}| = 22$ .

### Заключение

В работе предпринято развитие основ теории норм синдромов на семейства кодов Рида – Соломона. В основу исследований положено матричное задание этих кодов. Изучены естественные автоморфизмы на РС-кодах – циклические и аффинные подстановки. Исследованы основные свойства названных автоморфизмов, группы, ими порожденные, а также строение орбит ошибок в РС-кодах относительно группы  $\Gamma$  циклических, группы  $A$  аффинных подстановок и объединенной АГ-группы.

### Список литературы

1. MacWilliams F.J., Sloan J.J. *The Theory of Error-Correcting Codes*. Amsterdam: North-holland publishing company; 1977.
2. Липницкий В.А., Конопелько В.К. *Норменное декодирование помехоустойчивых кодов и алгебраические уравнения*. Минск: БГУ; 2007.
3. Кудряшов Б.Д. *Основы теории кодирования*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2016.
4. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. Изд. 2. Москва: Вильямс; 2003.
5. Блэйхут Р. *Теория и практика кодов, контролирующая ошибки*. Москва: Мир; 1986.
6. Moon T.K. *Error correction coding, mathematical methods and algorithms*. New Jersey U.S.A: John Wiley & Sons; 2005.
7. Липницкий В.А., Семёнов С.И. Преимущества применения теории полей Галуа для обработки РС-кодов. *Сборник научных статей Военной академии Республики Беларусь*. 2019;36:84-93.
8. Липницкий В.А. *Высшая математика. Основы линейной алгебры и аналитической геометрии*. Минск: ВА РБ; 2015.
9. Лидл Р., Ниддеррайтер Г. *Конечные поля*. Москва: Мир; 1988.
10. Липницкий В.А. *Современная прикладная алгебра. Математические основы защиты информации от помех и несанкционированного доступа*. Минск: БГУИР; 2006.

### References

1. MacWilliams F.J., Sloan J.J. *The Theory of Error-Correcting Codes*. Amsterdam: North-holland publishing company; 1977.
2. Lipnitsky V.A., Konopelko V.K. [Norm decoding of noise-resistant codes and algebraic equations]. Minsk: BGU; 2007. (In Russ.)
3. Kudryashov B.D. [Fundamentals of coding theory]. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2016. (In Russ.)
4. Scler B. [Digital communications. Fundamentals and Applications]. Ed. 2. Moscow: Wil'ams; 2003. (In Russ.)
5. Blejhut R. [Theory and practice of error control codes]. Moscow: Mir; 1986. (In Russ.)
6. Moon T.K. *Error correction coding, mathematical methods and algorithms*. New Jersey U.S.A: John Wiley & Sons; 2005.
7. Lipnitsky V.A., Semyonov S.I. [Advantages of using Galois field theory for processing RS-codes]. *Sbornik nauchnyh statey Voennoy akademii Respubliki Belarus = Sbornik nauchnyh statey Voennoy akademii Respubliki Belarus*. 2019;36:84-93. (In Russ.)
8. Lipnitsky V.A. [Higher mathematics. Fundamentals of linear algebra and analytic geometry]. Minsk: VA RB; 2015. (In Russ.)
9. Lidl R., Nidderrajter G. [Finite fields]. Moscow: Mir; 1988. (In Russ.)
10. Lipnitsky V.A. [Modern applied algebra. Mathematical fundamentals of protecting information from interference and unauthorized access]. Minsk: BGUIR; 2006. (In Russ.)

### Вклад авторов

Семёнов С.И. провел компьютерные вычисления, необходимые по содержанию статьи, непосредственно оформлял текст статьи.

Липницкий В.А. определил тему статьи и ее структуру, осуществлял консультативное руководство по работе над статьей.

### Authors' contribution

Semyonov S.I. conducted computer calculations necessary for the content of the article and directly designed the text of the article.

Lipnitsky V.A. determined the topic of the article and its structure and provided advisory guidance on the work on the article.

### Сведения об авторах

Семёнов С.И., м.т.н., адъюнкт кафедры информационно-вычислительных систем Военной академии Республики Беларусь.

Липницкий В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики Военной академии Республики Беларусь.

### Information about the authors

Semyonov S.I., M.Sci., PG student of Information and Computing Systems Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Lipnitsky V.A., D.Sci., Professor, Head of High Mathematics Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

### Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр-т Независимости, 220,  
Военная академия Республики Беларусь  
тел. +375-29-593-24-07;  
e-mail: [semyonov4213@gmail.com](mailto:semyonov4213@gmail.com)  
Семёнов Сергей Иванович

### Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,  
Military Academy of the Republic of Belarus  
tel. +375-29-593-24-07;  
e-mail: [semyonov4213@gmail.com](mailto:semyonov4213@gmail.com)  
Semyonov Sergey Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-28-35>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.865.8

## МЕХАТРОННОЕ УСТРОЙСТВО СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

КУЛЬША А.Ю.<sup>1</sup>, КЛИМОВИЧ М.А.<sup>1</sup>, СТЕРЖАНОВ М.В.<sup>1</sup>, ТЕСЛЮК В.Н.<sup>1</sup>, ЕГОРОВА Н.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27 декабря 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Цель работы, представленной в статье, заключается в демонстрации поэтапной разработки мехатронного устройства, описании процесса разработки конструкции устройства, его программного обеспечения, демонстрации применения теории избранных разделов математики и физики в области робототехники, и в частности: линейной алгебры, геометрии, вычислительной математики, дискретной математики, механики. Исследование проводилось на основе мехатронного устройства, которое было спроектировано в рамках подготовки к международному турниру по робототехнике «First Global Challenge 2019» молодежной командой Республики Беларусь, ставшей победителем данных соревнований. В статье подробно описана постановка задачи на данном турнире, выделены основные требования к создаваемому роботу, представлено общее описание этапов создания устройства как в ходе проектирования, так и при непосредственной реализации проекта, а также обоснованы инженерные решения, которые были приняты в процессе конструирования. Более подробно описаны этапы, представляющие наибольший интерес с точки зрения применения теории прикладной физики и математики. Особое внимание в статье уделено проектированию и разработке модулей конструкции, а также разработке программного обеспечения для управления устройством. Робот представляет собой экспериментальную модель, которая может быть использована в дальнейших исследованиях в области искусственного интеллекта, машинного обучения, систем автоматизации, а также является потенциальной платформой для обучения робототехнике на уровне среднего специального и высшего образования.

**Ключевые слова:** мехатронные устройства, робототехника, мобильная платформа, механика, программирование.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы благодарят Францкевича А.А. за ценные рекомендации и замечания по вопросам робототехники. В команду по робототехнике входили: Кульша А.Ю., Говор Е.И., Олексин С.А., Латушко Т.А., Шпилевский М.И.

**Для цитирования.** Кульша А.Ю., Климович М.А., Стержанов М.В., Теслюк В.Н., Егорова Н.Г. Мехатронное устройство систем искусственного интеллекта. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 28-35.

## MECHATRONIC DEVICE OF AI SYSTEMS

ALEKSANDR Y. KULSHA<sup>1</sup>, MAKSIM A. KLIMOVICH<sup>1</sup>, MAKSIM V. STERJANOV<sup>1</sup>,  
VLADIMIR N. TESLUK<sup>1</sup>, NATALJA G. EGOROVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
(Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>2</sup>*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus  
(Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 27 декабря 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The purpose of this work is to demonstrate the phased development of a mechatronic device, to describe the development process of the device design and software, to demonstrate the application of the theory of selected sections of mathematics and physics in robotics, and, in particular, linear algebra, geometry, computational mathematics, discrete mathematics and mechanics. The study was based on the mechatronic device, which had been designed by the youth team of the Republic of Belarus in preparation for the international robotics competition “First Global Challenge 2019”, which became the winner of this event. The article describes in detail the statement of the problem at this competition, identifies the basic requirements for the robot being built, provides a general description of the stages of building the device both during the design process and during the immediate implementation of the project, as well as substantiates the engineering decisions that were made during the design process. The stages that are of the greatest interest in terms of applying the theory of applied physics and mathematics are described in more detail. Particular attention is paid to the design and development of structural modules, as well as to the development of software for controlling the device. The robot is an experimental model that can be used in further research in the field of artificial intelligence, machine learning, automation systems, and is also a potential platform for teaching robotics at the level of specialized secondary and higher education.

**Keywords:** mechatronic devices, robotics, mobile platform, mechanics, programming.

**Gratitude.** The authors thank Frantskevich A.A. for valuable recommendations and comments on robotics. The robotics team included: Kulsha A.Yu., Govor E.I., Oleksin S.A., Latushko T.A., Shpilevsky M.I.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Kulsha A.Y., Klimovich M.A., Sterjanov M.V., Tesluk V.N., Egorova N.G. Mechatronic device for AI systems. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 28-35.

### Введение

Процесс разработки роботов, как и любых автоматических мехатронных устройств, начинается с определения потребностей, изучения основных концепций и постановки задачи. Задача молодежной команды Республики Беларусь по робототехнике состояла в том, чтобы разработать специализированного робота для участия в международных соревнованиях FIRST Global Challenge. Каждый год конкурсантами решается новая техническая задача, имеющая отношение к глобальным проблемам и утвержденная Национальной инженерной академией США. В 2019 году соревнования FIRST Global Challenge проходили в Объединенных Арабских Эмиратах и были посвящены проблеме загрязнения мирового океана.

## Постановка задачи

В соответствии с тематикой турнира участникам предстояло смоделировать действия по очистке мирового океана. Перед началом матча каждая сторона игрового поля<sup>3</sup> (рис. 1), условно представляющего поверхность океана, покрыта загрязнителями, распределенными случайным образом. В общей сложности тридцать микрозагрязняющих и пятьдесят макрозагрязняющих элементов, представленных шариками разного размера, засоряют океан. Очистные бригады (или так называемые альянсы), состоящие из трех национальных команд, набирают баллы за счет переноса загрязняющих элементов в два района обработки, расположенных в океане – баржа обработки и центр восстановления. Длительность матча – 2,5 мин.

Роботы-коллекторы набирают очки, размещая загрязняющие элементы на трех уровнях баржи обработки, каждый из которых представляет разные степени переработки. По мере продвижения уровней от низшего к высшему количество получаемых очков увеличивается (два, три и шесть очков за каждый элемент в соответствии с уровнем).

Центры восстановления, по одному на каждый альянс, расположены в углах поля. Коллекторы набирают очки, внося загрязняющие вещества в эти зоны, получая по одному очку за каждый доставленный загрязнитель. Дополнительные очки можно заработать за каждого робота-сборщика, который пристыковывается к барже для обработки. Частично пристыкованные коллекторы, соприкасающиеся с рампой баржи обработки, получают пять очков; полностью состыкованные коллекторы, находящиеся на рампе баржи обработки и не касающиеся поверхности поля – десять очков; поднятые пристыкованные коллекторы, свисающие с рельса, окружающего перерабатывающий уровень перерабатывающей баржи – двадцать очков.



Рис. 1. Схема игрового поля  
Fig. 1. Playing field scheme

Альянс, набравший наибольшее количество очков к концу матча, объявляется победителем этого матча.

После изучения правил игры команда Республики Беларусь пришла к следующей стратегии:

- собрать максимально возможное количество микрозагрязнителей в короткий промежуток времени и поместить их на верхний уровень баржи обработки;
- пристыковаться к барже обработки и подняться на рельсе, заработав максимальное количество очков за стыковку.

Таким образом, задача команды состояла в создании и программировании робота [1], обладающего следующими свойствами:

- высокая мобильность;
- легкий/средний вес конструкции;
- высокая скорость;

<sup>3</sup> Схема игрового поля и дополнительные материалы доступны на официальном сайте соревнований: <https://first.global/fgc>.

- возможность стыковки;
- наличие механизма выгрузки загрязнителей на третий уровень баржи обработки;
- наличие механизма загрузки.

В результате членами команды использовался следующий процесс:

- проектирование и разработка модулей конструкции;
- разработка программного обеспечения;
- тестирование и отладка.

### Проектирование и разработка модулей конструкции

При проектировании и сборке шасси робота команда Республики Беларусь пришла к выводу о необходимости использования омни-колес<sup>4</sup> [2] для достижения поставленной выше задачи. Робот на омни-колесах может двигаться в любом направлении по любой дуге, не меняя своей ориентации в пространстве, что дает большое преимущество во время матча [3]. При этом трение скольжения между колесами и опорной поверхностью практически отсутствует. Данное достоинство омни-колес одновременно является и их недостатком – отсутствие трения не позволяет роботу зафиксировать свое положение на наклонной поверхности [4]. С целью устранения этого недостатка был разработан механизм, в основе которого заложен принцип стояночного тормоза.

Для создания подъемного механизма членам команды понадобилось преобразовать вращательное движение в прямолинейное. Для этого, исходя из технических возможностей робототехнического набора и поставленных требований, была разработана система, схематично представленная на рис. 2.

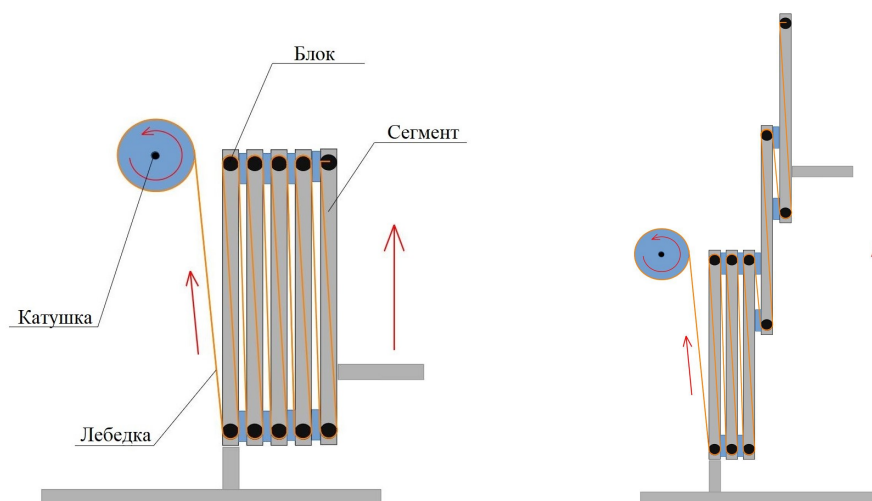


Рис. 2. Система подъема  
Fig. 2. Elevation system

Вращательное движение оси мотора используется для намотки лебедки на катушку; натяжение лебедки в свою очередь приводит в движение элеватор при помощи блочной системы, установленной на сегментах механизма, соединенных подвижно. Каждый сегмент представляет из себя металлическую балку с закрепленными на концах блоками. Изучив схему игрового поля, было выяснено необходимое количество подвижных сегментов, производя необходимые расчеты по формуле (1).

$$n = \left\lceil \frac{H}{l} \right\rceil + 1, \quad (1)$$

<sup>4</sup> Huang L., Lim Y., Lee D., Teoh C.E. Design and analysis of a four-wheel omnidirectional mobile robot. 2nd International Conference of Autonomous Robots and Agents, 2004:425-428.

где  $n$  – количество подвижных сегментов,  $H$  – необходимая высота подъема (см),  $l$  – длина сегмента (см).

Таким образом, данная конструкция обеспечивает подъем загрязнителей на высоту третьего уровня баржи переработки, что полностью соответствует поставленным требованиям.

Механизм сборки загрязнителей представляет из себя систему вращающихся валов с закрепленными на ними «щетками». Чтобы обеспечить высокую скорость их вращения, была использована цепь, передающая момент вращения оси мотора валам. Цепная передача – это передача механической энергии при помощи гибкого элемента – цепи, за счет сил зацепления. Состоит из ведущей и ведомой звездочки и цепи, а цепь, в свою очередь, состоит из подвижных звеньев [5].

Опытным путем была получена оптимальная конфигурация звездочек, количество звеньев в цепи рассчитывается по формуле

$$L = \left[ \frac{2C}{P} + \frac{N+p}{2} + \frac{P \left( \frac{N-n}{2\pi} \right)^2}{C} \right], \quad (2)$$

где  $L$  – количество звеньев в цепи;  $C$  – расстояние между осями вращения звездочек (см);  $P$  – длина звена (см);  $N$  – количество зубьев большей звездочки;  $n$  – количество зубьев меньшей звездочки.

Для обеспечения высокой пропускной способности механизма был использован вал максимальной длины. Таким образом, робот был обеспечен функцией сбора загрязнителей с приемлемой скоростью и пропускной способностью.

Процесс выгрузки осуществлялся с помощью контейнера хранения. Он оснащен сервоприводом, который отпирает крышку и освобождает область хранения. Возвратное действие происходит за счет натяжения резиновых жгутов, закрепленных на крышке и контейнере. Собранный прототип представлен на рис. 3.

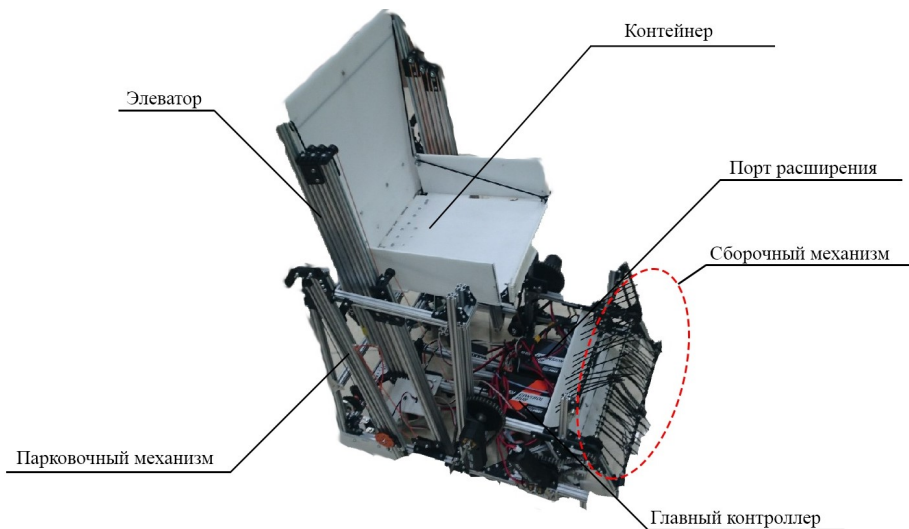


Рис. 3. Собранный прототип  
Fig. 3. Assembled prototype

### Разработка программного обеспечения

Основываясь на конструкции робота, при разработке программного обеспечения требовалось решить следующие задачи:

- получение данных с пульта управления;
- обработка полученных данных;



– разработка классов и функций для управления омни-колесами, стояночным механизмом, элеватором и выгрузкой контейнера.

Для получения данных с пульта управления требуется планшет, который подключается к главному контроллеру через wifi 2.4g. Полученные данные преобразуются библиотекой, предоставленной производителем контроллера. Например, чтобы получить данные по оси абсцисс с правого стика, необходимо вызвать метод *right\_stick\_x* на объекте класса *Gamedpad*. Данный метод возвращает значение от  $-1$  до  $1$  в зависимости от положения правого стика.

Управление элеватором происходит при помощи двух стиков. Использование двух стиков вместо одного обусловлено независимостью моторов и возможностью рассинхронизации подъемных механизмов между собой. Мощность мотора может принимать значение от  $-1$  до  $1$ , где знак обозначает направление вращения мотора.

Для управления контейнером и стояночным механизмом использовались сервомоторы, которые могут фиксироваться в определенном положении. Положения определяются вручную и записываются в программу в качестве констант. Кнопка «А» во втором пульте управления предназначена для взаимодействия с контейнером. Аналогично и для стояночного механизма, который управляется первым пультом.

Заключаящим этапом является программирование движения на омни-колесах [6–8]. Упрощенная модель робота с омни-колесами показана на рис. 4.

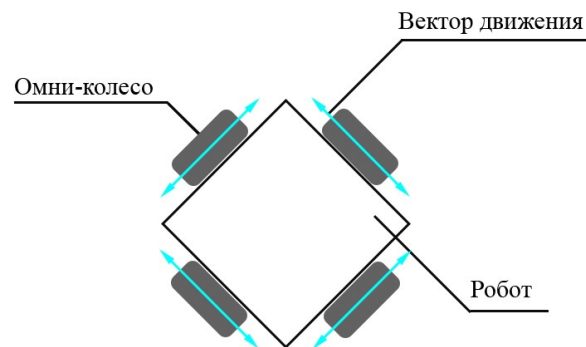


Рис. 4. Модель робота с омни-колесами  
Fig. 4. Robot model with omni wheels

Управление ходовой частью робота осуществляется с помощью двух стиков: один стик позволяет роботу вращаться вокруг собственной оси, другой – двигаться в заданном направлении. Для поворота робота по часовой стрелке необходимо отклонить левый стик вправо, против часовой стрелки – влево.

Для осуществления движения в заданном направлении колеса разделяются на две группы, причем противоположные колеса объединяются и двигаются в одном направлении. Группе из заднего и переднего колеса передается значение смещения правого стика по оси  $X$ , а боковым – по оси  $Y$ . Пример движения на рис. 5.

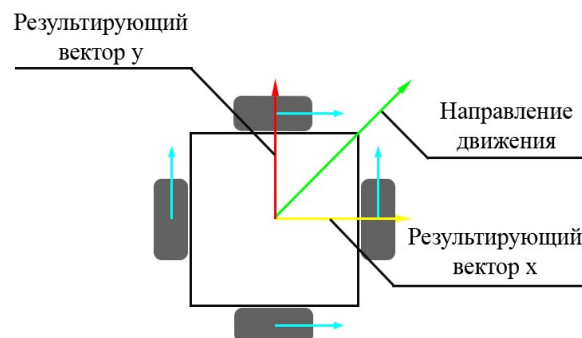


Рис. 5. Пример движения под углом  $45^\circ$   
Fig. 5. An example of movement a 45-degree angle

В силу конструктивных особенностей центральная ось робота расположена под углом  $45^\circ$  к осям, проходящим через центры противоположных колес, поэтому формула движения преобразуется с помощью матрицы поворота векторов в двумерном пространстве:

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \mp \sin(\theta) \\ \pm \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол поворота.

Набор новых значений для передачи в моторы получается путем умножения матрицы поворота на вектор-столбец, координаты которого – значения смещения стика по осям:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \mp \sin(\theta) \\ \pm \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (4)$$

С учетом значения заданного угла формула приобретает следующий вид:

$$\begin{pmatrix} x' = x \frac{\sqrt{2}}{2} + y \frac{\sqrt{2}}{2} \\ y' = -x \frac{\sqrt{2}}{2} + y \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

### Заключение

В результате исследования и разработки был создан уникальный прототип робота, который принес победу в международных соревнованиях по робототехнике FIRST Global Challenge. Прототип имеет высокий потенциал: робот является универсальной базой для разработки мехатронных устройств, предназначенных для выполнения узконаправленных специфических задач. Робот может использоваться в качестве платформы для исследований в области искусственного интеллекта.

### Список литературы

1. Нгуен Н.М. Разработка математической модели погрузочно-разгрузочного устройства с всенаправленными колесами. *Труды МАИ*. 2012;58:22.
2. Pin F.G., Killough S.M. A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*. 1994;10(4):480-489.
3. Лапшин В.П., Коба Я.Д., Абалов А.А. Omni-колеса как способ решения проблемы нелинейного взаимодействия колеса и опорной поверхности в малых мобильных платформах. *Молодой исследователь Дона*. 2018;4(13):88-89.
4. Вонг Дж. *Теория наземных транспортных средств*. Москва: Машиностроение; 1982.
5. Воробьев Н.В. *Ценные передачи*. Изд. 4-е. Москва: Машиностроение; 1968.
6. Андреев А.С., Кудашова Е.А. О моделировании структуры управления для колесного робота с омни-колесами. *Автоматизация процессов управления*. 2015;2:114-121.
7. Мартыненко Ю.Г., Формальский А.М. О движении мобильного робота с роликонесущими колесами. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2007;6:142-149.
8. Зобова А.А., Татаринцов Я.В. Динамика экипажа с роликонесущими колесами. *Прикладная математика и механика*. 2009;73:13-22.

### References

1. Nguen N.M. [Development of a mathematical model of loading and unloading devices with Omnidirectional wheels]. *Trudy MAI = Trudy MAI*. 2012;58:22. (In Russ.)
2. Pin F.G., Killough S.M. A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*. 1994;10(4):480-489.

- Lapshin V.P., Koba Y.D., Abalov A.A. [Omni wheels as the way to solve the problem of non-linear interaction of the wheel and the bearing area in small mobile platforms]. *Molodoj issledovatel' Dona = Molodoj issledovatel' Dona*. 2018;4(13):88-89. (In Russ.)
- Wong J.Y. [*Theory of ground vehicles*]. Moscow: Mashinostroenie; 1982. (In Russ.)
- Vorobyov N.V. [*Chain transitions*]. 4th ed. Moscow: Mashinostroenie; 1986. (In Russ.)
- Andreev A.S., Kudashova E.A. [Control structure modeling for a wheeled robot with omni wheel]. *Avtomatizaciya processov upravleniya = Automation of Control Processes*. 2015;2:114-121. (In Russ.)
- Martynenko Yu.G., Formal'skij A.M. [Movement of a mobile robot with roller-bearing wheels]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2007;6:142-149. (In Russ.)
- Zobova A.A., Tatarinov Y.V. [The dynamics of the crew with roller-bearing wheels]. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Prikladnaya matematika i mekhanika*. 2009;73:13-22. (In Russ.)

### Вклад авторов

Кульша А.Ю. принял участие в разработке робота, описал процесс конструирования.  
Климович М.А. принял участие в разработке программного обеспечения, описал процесс его разработки.  
Стержанов М.В. курировал разработку и редактирование статьи.  
Теслюк В.Н. разработал математическую модель движения робота.  
Егорова Н.Г. разработала дискретную логическую математическую модель движения робота.

### Authors' contribution

Kulsha A.Y. took part in the robot designing and described this process.  
Klimovich M.A. took part in software development, described its designing process.  
Sterjanov M.V. oversaw the development and editing of the article.  
Teslyuk V.N. developed the mathematical model of the movement of the robot.  
Egorova N.G. developed the discrete logical mathematical model of the robot movement.

### Сведения об авторах

Кульша А.Ю., студент факультета компьютерных систем и сетей Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Климович М.А., студент факультета компьютерных систем и сетей Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Стержанов М.В., к.т.н, доцент, доцент кафедры информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Теслюк В.Н., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Егорова Н.Г., к.т.н, старший научный сотрудник лаборатории математической кибернетики Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-376-58-47;  
e-mail: sterjanov@bsuir.by  
Стержанов Максим Валерьевич

### Information about the authors

Kulsha A.Y., student of Faculty of Computer Systems and Networks of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Klimovich M.A., student of Faculty of Computer Systems and Networks of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Sterjanov M.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Informatics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Teslyuk V.N., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Informatics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Egorova N.G., PhD, Senior Researcher of the Laboratory of Mathematical Cybernetics of United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-88-41;  
e-mail: sterjanov@bsuir.by  
Sterjanov Maksim



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-36-43>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 681.2

## СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

РЫБАК В.А., РЯБЫЧИНА О.П.

*Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 21 февраля 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Цель работы – разработка и апробирование аппаратно-программной системы для экологического мониторинга атмосферного воздуха в режиме реального времени. В статье обоснована актуальность создания заявленной системы, показано, что имеющимися средствами невозможно получать оперативные данные о степени загрязнения атмосферного воздуха, хотя данная информация является важной для населения крупных городов и промышленных центров. Изложены результаты создания и использования автоматизированной системы для мониторинга атмосферного воздуха с использованием моделирования переноса загрязняющих веществ. В основу системы лег аппаратно-программный комплекс, состоящий из микрокомпьютера, датчиков загрязнения, модуля беспроводной связи и беспилотного летательного аппарата. Получаемые в режиме реального времени показатели загрязненности обрабатываются с целью построения актуальных карт, в том числе для предоставления возможности выбора оптимального маршрута следования с учетом неблагоприятного воздействия загрязнения. Разработанное мобильное приложение предоставляет возможность конечному пользователю получать информацию on-line и строить прогнозы, основанные на данных о скорости ветра и его направлении в краткосрочной и среднесрочной перспективе. В качестве основной модели переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе выбрана методика ОНД-86, являющаяся обязательной в Республике Беларусь. Информация о силе и направлении ветра для построения прогнозов берется из открытых Интернет-источников метеоданных. С использованием реальных данных о массе выбросов производится построение карты планируемой концентрации, которая рассеивается пропорционально удалению от источника выброса с учетом силы и направления ветра. Получаемый таким образом прогноз может быть использован для выбора оптимального маршрута следования, оптимизации транспортных потоков и организации действий при чрезвычайных ситуациях, связанных с утечкой и выбросов вредных веществ.

**Ключевые слова:** мониторинг атмосферного воздуха, карты загрязненности, прогнозирование переноса загрязняющих веществ, аппаратно-программный комплекс.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Рыбак В.А., Рябычина О.П. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 36-43.

## ECOLOGICAL MONITORING SYSTEM OF THE ATMOSPHERE

VICTOR A. RYBAK, OLGA P. RYABICHINA

*Belarusian State Academy of Telecommunications (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 21 February 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The research is targeted at the development and testing of a hardware-software system for environmental monitoring of atmospheric air in real time. The relevance of creating the system is substantiated in the article where it is shown that one cannot obtain operational data on the degree of atmospheric air pollution using available means, although this information is important for the population of large cities and industrial centers. The results of the creation and use of the automated system for monitoring atmospheric air using the modeling of transfer of pollutants are presented. The system was based on a hardware-software complex consisting of a microcomputer, pollution sensors, a wireless communication module, and an unmanned aerial vehicle. Real-time pollution indicators are processed in order to build up-to-date maps, including to provide the opportunity to choose the optimal route taking into account the adverse effects of pollution. The developed mobile application provides the opportunity for the end user to receive information on-line and make forecasts based on the data on wind strength and direction in the short and medium term. The OND-86 methodology, which is mandatory in the Republic of Belarus, was chosen as the main model for the transfer of pollutants in the air. Information about the strength and direction of the wind for building forecasts is taken from open Internet sources of weather data. Using real data on the mass of emissions, a map of the planned concentration is constructed, which is scattered in proportion to the distance from the source of the emission, taking into account the strength and direction of the wind. The forecast obtained in this way can be used to select the optimal route, optimize traffic flows and organize actions in emergency situations associated with leakage and emissions of harmful substances.

**Keywords:** monitoring of atmospheric air, pollution maps, forecasting the transfer of pollutants, hardware-software complex.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Rybak V.A., Ryabichina O.P. Ecological monitoring system of the atmosphere. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 36-43.

### Введение

В современных условиях крупных городов и промышленных центров проблема загрязнения окружающей среды является достаточно критичной, оказывающей влияние на людей и их состояние. Среди всех природных компонентов атмосферный воздух является наиболее важным для жизни населения, а его загрязнение сразу и непосредственно оказывает неблагоприятное воздействие. Поэтому видится актуальной разработка системы экологического мониторинга атмосферного воздуха, которая позволит в режиме реального времени получать достоверные данные о его качестве [1, 2].

Существующие комплексы мониторинга обладают рядом недостатков, главные из которых: пакетная обработка данных, неравномерное распределение по территории страны и невозможность оперативного получения актуальной информации. Все это не позволяет конечному пользователю получить информацию о концентрации загрязняющих веществ по пути его следования, а также спрогнозировать изменение состояния с учетом направления и силы ветра.

## Методика проведения эксперимента

Для решения вышеуказанной научно-технической проблемы был разработан аппаратно-программный комплекс для мобильного мониторинга состояния атмосферного воздуха, состоящий из микрокомпьютера, датчиков загрязнения, модуля беспроводной связи и беспилотного летательного аппарата [1, 3]. Получаемые данные позволяют строить карты загрязненности в режиме реального времени. Вместе с тем представляет научный и практический интерес прогнозирование изменения загрязненности атмосферного воздуха с учетом направления и силы ветра, например, для получения наиболее безопасного маршрута следования группы детей, оптимизации транспортных потоков, эвакуации в случае техногенных аварий.

Для оценки переноса загрязняющих веществ в окружающей среде применяется моделирование. Точность и адекватность модели обуславливается несколькими факторами, среди которых количество учитываемых параметров и размер территории. Условно разделяя масштаб модели на локальный, региональный и глобальный, становится возможным упрощать расчет и корректировать точность. Другими словами, при значительном удалении от источника загрязнения большее значение приобретает средняя концентрация, а не пики выбросов, рассредоточенные во времени.

Для решения поставленных задач будет рассматриваться масштаб моделей, соответствующий локальному и городскому уровню. Поэтому самым весомым компонентом, оказывающим неблагоприятное влияние на окружающую среду, будет локальный перенос. Это позволяет несколько упростить модель. Однако неоднородность городской застройки и изменчивость ландшафта наоборот вносят дополнительную сложность в процесс моделирования. Также известно, что на урбанизированных территориях в результате повышенной температуры создаются дополнительные процессы движения воздушных масс, включая смог и «парниковый» эффект, оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье человека.

Таким образом, моделирование процесса переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на городских территориях должно базироваться на сложных и точных моделях, учитывающих много факторов, но, с другой стороны, – не быть обремененным большим количеством трудно получаемых показателей. Главными источниками данных о массе выбросов стационарных объектов являются тома предельно допустимых концентраций, утверждаемые структурами Минприроды [4, 5].

Известны различные типы моделей для расчета переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, в основу которых легли теоретические и эмпирические закономерности турбулентной диффузии. Существуют также упрощенные модели, позволяющие осуществлять быстрые приближенные оценки распространения загрязнения. Такие модели, как правило, базируются на гауссовых уравнениях, коэффициенты для которых максимально адаптированы для той или иной местности и детерминированы климатическими особенностями.

В Республике Беларусь для оценки переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе официальной является методика ОНД-86. Согласно этой методике, загрязнение атмосферы выбросами одиночного источника рассчитывается, как максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $c_m$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем, которое достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$  (м) от источника и определяется по формуле [6, 2]:

$$c_m = \frac{AMF_{mn\eta}}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;

$M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;

$m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;

$H$  – высота источника выброса над уровнем земли, м (для наземных источников при расчетах принимается  $H = 2$  м);

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ ;

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_r$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b$ , °С;

$V_1$  (м<sup>3</sup>/с) – расход газовой смеси.

Расстояние от источника выброса  $x_{ми}$  (м), на котором при скорости ветра  $u$  и неблагоприятных метеорологических условиях приземная концентрация вредных веществ достигает максимального значения  $c_{ми}$  (мг/м<sup>3</sup>), определяется по формуле

$$x_{ми} = p x_m, \quad (2)$$

где  $p$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $u/u_m$  по формулам:

$$p = 3 \text{ при } u/u_m \leq 0,25; \quad (3 \text{ а})$$

$$p = 8,43(1 - u/u_m)^3 + 1 \text{ при } 0,25 < u/u_m \leq 1; \quad (3 \text{ б})$$

$$p = 0,32u/u_m + 0,68 \text{ при } u/u_m > 1. \quad (3 \text{ в})$$

При опасной скорости ветра  $u_m$  приземная концентрация вредных веществ  $c$  (мг/м<sup>3</sup>) в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях  $x$  (м) от источника выброса определяется по формуле

$$c = s_1 c_m, \quad (4)$$

где  $s_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $x/x_m$  и коэффициента  $F$  по формулам:

$$s_1 = 3(x/x_m)^4 - 8(x/x_m)^3 + 6(x/x_m)^2 \text{ при } x/x_m \leq 1; \quad (5 \text{ а})$$

$$s_1 = \frac{1,13}{0,13(x/x_m)^2 + 1} \text{ при } 1 < x/x_m \leq 8; \quad (5 \text{ б})$$

$$s_1 = \frac{x/x_m}{3,58(x/x_m)^2 - 35,2(x/x_m) + 120} \text{ при } F \leq 1,5 \text{ и } x/x_m > 8; \quad (5 \text{ в})$$

$$s_1 = \frac{1}{0,1(x/x_m)^2 + 2,47(x/x_m) - 17,8} \text{ при } F > 1,5 \text{ и } x/x_m > 8. \quad (5 \text{ г})$$

Для нескольких веществ, которые оказывают объединенное неблагоприятное воздействие, безразмерная суммарная концентрация  $q$  или приведенная к одному веществу суммарная концентрация  $c$  рассчитываются с использованием для каждого источника значений мощности  $M_q$  или  $M$  соответственно, где:

$$M_q = \frac{M_1}{ПДК_1} + \frac{M_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{M_n}{ПДК_n}, \quad (6)$$

$$M = M_1 + M_2 \frac{ПДК_1}{ПДК_2} + \dots + M_n \frac{ПДК_1}{ПДК_n}, \quad (7)$$

где  $M_1, M_2, \dots, M_n$  – мощности выброса каждого из  $n$  веществ;  $ПДК_1, ПДК_2, \dots, ПДК_n$  – максимальные разовые предельно допустимые концентрации этих веществ.

В остальном расчетная схема остается без изменения. В частности, учет суммации вредного действия для одиночного источника не влияет на значения расстояния  $x_m$ , где достигается наибольшее загрязнение воздуха, и опасной скорости ветра  $u_m$ .

С учетом практической направленности исследований исходными данными для работы являются: радиус выброса, концентрация, коэффициент скорости оседания. Актуальные данные о направлении и скорости ветра берутся с метеорологических Интернет-источников. В результате моделирования получается нанесенная на карту зона распространения загрязнителя с количественными градациями, выделенными различным цветом [7].

Предложен алгоритм прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха, который берет данные об уровне загрязнения и ветре в начальной точке, исходя из направления и скорости ветра, вычисляются новые две точки с 15-минутным интервалом и высчитывается концентрация по формуле (4). Затем строится полигон по новым двум точкам и двум старым. Такой расчет производится каждые 15 минут. Каждые три часа информация о значениях воздуха обновляется. В качестве источника информации с актуальными данными о скорости и направлении ветра используется сайт [openweathermap.org](http://openweathermap.org).

### Результаты и их обсуждение

Для моделирования переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в программном комплексе должны выполняться следующие функции: получение данных с датчиков экологического мониторинга, которые будут использоваться для расчета концентрации загрязнения в точках; моделирование переноса вредных веществ и отображение результатов на карте [8].

Функция моделирования должна быть реализована с учетом следующих требований:

- функция должна рассчитывать концентрацию загрязняющих веществ, опираясь на данные, полученные с датчиков;
- функция должна рисовать смоделированную картину переноса загрязняющих веществ на карте;
- функция должна отображать степень концентрации загрязняющих веществ, используя цветовую палитру;
- зависимость цвета от концентрации должна быть показана на легенде на карте.

Программный комплекс для моделирования переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе представлен на рис. 1.

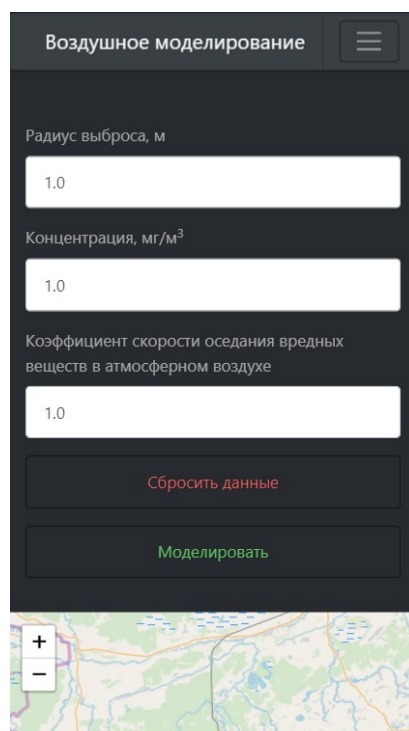


Рис. 1. Мобильная версия главной страницы программного комплекса  
Fig. 1. Mobile version of the main page of the software package



Получаемые таким образом прогнозы более точно отражают движение загрязнителей при локальном выбросе и могут быть использованы, в том числе, при внештатных, чрезвычайных ситуациях (рис. 2).

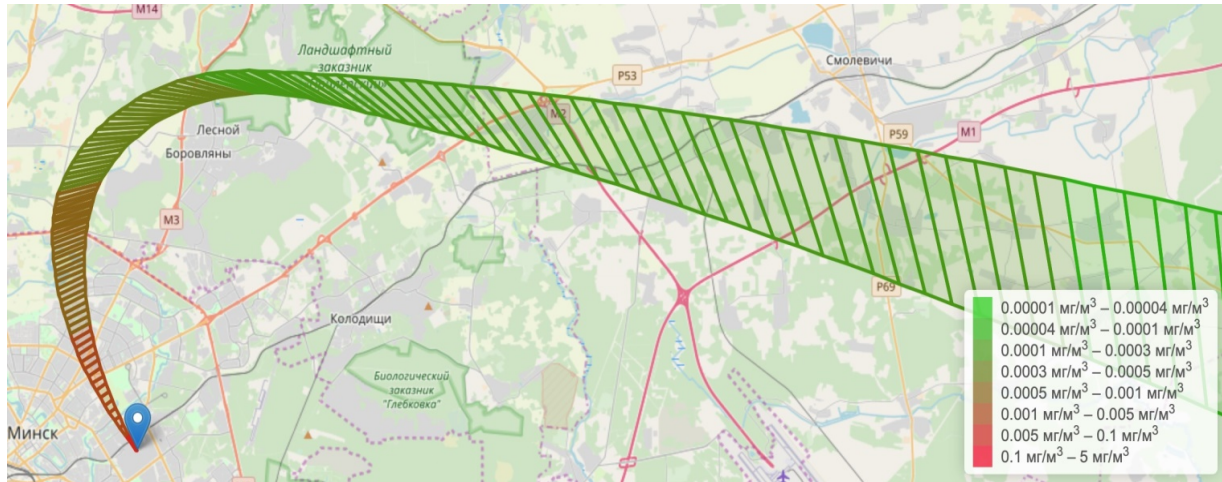


Рис. 2. Прогнозирование движения загрязнения атмосферного воздуха с учетом изменения силы и направления ветра

Fig. 2. Prediction of the movement of air pollution, taking into account changes in the strength and direction of the wind

В общем виде структура разработанной системы представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структура предложенной системы поддержки принятия решений при выборе оптимального маршрута с учетом загрязненности воздуха

Fig. 3. The structure of the proposed decision-making support system when choosing the optimal route taking into account air pollution

### Заключение

Таким образом, в ходе проведенных работ была создана и апробирована система экологического мониторинга атмосферного воздуха, позволяющая в режиме реального времени получать актуальные данные о загрязненности, строить карты и прогнозы изменения качества с учетом выбросов, силы и направления ветра [8, 9]. В результате получаемые данные могут быть использованы для выбора оптимального маршрута следования людей с точки зрения минимизации неблагоприятного воздействия на их здоровье.

### Список литературы

1. Рябычина О.П., Рыбак В.А. Методы и средства мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. *Проблемы инфокоммуникаций*. 2018;1(7).
2. Рыбак В.А. *Методологические основы принятия решений для управления природоохранной деятельностью*. Минск: РИВШ; 2009.
3. Рыбак В.А., Рябычина О.П. Обзор методов и средств мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2018;4.
4. Рябычина О.П., Рыбак В.А. Информационная подсистема анализа загрязнения атмосферного воздуха. *Вестник связи*. 2019;2(154).
5. Рыбак В.А. *Антропогенная нагрузка на окружающую среду: количественная оценка, анализ, нормирование: монография*. Минск: РИВШ; 2010.
6. Рыбак В.А. *Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения*. Минск: РИВШ; 2008.
7. Рыбак В.А., Ахмад Ш., Гриб А.Д. *Научно-методические основы и программные средства автоматизации оценки и анализа параметров перспективных эколого-безопасных*. Минск: РИВШ; 2017.
8. Рыбак В.А., Ганбари З., Рябычина О.П. Перспективы применения новейших информационных технологий в экологической диагностике, распознавании образов и томографии. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2018;6.
9. Рыбак В.А., Гриб А., Ахмад Ш. Анализ сущности «зеленой экономики» и инструментов управления качеством окружающей среды на примере Республики Беларусь. *Интерактивная наука*. 2016;4.

### References

1. Ryabychina O.P., Rybak V.A. [Methods and means of monitoring air pollution]. *Infocommunication problems*. 2018;1(7). (In Russ.)
2. Rybak V.A. [Methodological basis for decision-making for environmental management]. Minsk: RIVSH; 2009. (In Russ.)
3. Rybak V.A., Ryabychina O.P. [Overview of methods and means of monitoring air pollution]. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tehniczeskie nauki = Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2018;4. (In Russ.)
4. Ryabychina O.P., Rybak V.A. [Information subsystem for analysis of air pollution]. *Vesnik svyazi = Vesnik svyazi*. 2019;2(154). (In Russ.)
5. Rybak V.A. [Anthropogenic load on the environment: quantitative assessment, analysis, rationing: monograph]. Minsk: RIVSH; 2010. (In Russ.)
6. Rybak V.A. [The effect of environmental pollution on public health]. Minsk: RIVSH; 2008. (In Russ.)
7. Rybak V.A., Ahmad Sh., Mushroom A.D. [Scientific and methodological foundations and software for automating the assessment and analysis of promising environmental-friendly parameters]. Minsk: RIVSH; 2017. (In Russ.)
8. Rybak V.A., Ganbari Z., Ryabychina O.P. [Prospects for the use of the latest information technologies in environmental diagnostics, pattern recognition and tomography]. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tehniczeskie nauki = Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences*. 2018;6. (In Russ.)
9. Rybak VA, Mushroom A., Ahmad Sh. [Analysis of the essence of the “green economy” and environmental quality management tools using the example of the Republic of Belarus]. *Interaktivnaya nauka = Interactive science*. 2016;4. (In Russ.)

### Вклад авторов

Рыбак В.А. выдвинул идею исследования, выполнил оформление статьи.  
Рябычина О.П. провела исследования и апробирование их результатов.

### Authors' contribution

Rybak V.A. put forward the idea of research and completed the design of the paper.  
Ryabychina O.P conducted the research and tested the results.

**Сведения об авторах**

Рыбак В.А., к.т.н., доцент, проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Рябычина О.П., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры программного обеспечения сетей телекоммуникаций Белорусской государственной академии связи.

**Адрес для корреспонденции**

220022, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-677-43-38;  
Рыбак Виктор Александрович

**Information about the authors**

Rybak V.A., PhD, Associate Professor, vice-Rector for Academic Affairs, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Ryabychina O.P., master of technical sciences, Senior Lecturer, Telecommunication Networks Software Department, Belarusian State Academy of Communications.

**Address for correspondence**

220022, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-29-677-43-38;  
Rybak Victor Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-44-52>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 004.774.2

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ

ПОТАРАЕВ В.В., СЕРЕБРЯНАЯ Л.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 4 марта 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Выполнен анализ модели представления данных и знаний в виде семантической сети. Обоснован ее выбор для работы с текстовой информацией. Сформулирована задача автоматической генерации семантической сети на основе произвольного текста на русском языке. Приведены исходные данные, условия и ограничения, необходимые для алгоритма построения сети. В результате анализа части речи каждого слова и порядка слов в предложении установлены семантические отношения между словами. Создан словарь лексем, с помощью которого определяются части речи слов из предложений. Выбрано множество видов вопросов, используемых в семантической сети. Количество отношений в сети регулируется за счет возможности использовать только нужные типы связей при решении конкретной задачи. При этом отношения в семантической сети могут быть самых разных типов, что делает ее универсальной моделью представления данных и знаний. Разработан алгоритм, позволяющий получать ответы на поставленные вопросы. Рассмотрены предложения, для которых автоматически построена модель семантической сети. В предложенном алгоритме семантическая сеть интерпретируется как неориентированный граф, на котором для поиска ответа на вопрос применен алгоритм поиска в ширину. Разработанные алгоритмы реализованы в программном средстве, которое автоматически строит семантическую сеть для произвольного текста. Созданное программное средство позволяет задавать вопросы и получать на них ответы на основе информации, хранящейся в семантической сети. Эксперименты показали, что построенная семантическая сеть дает правильные ответы на поставленные ей вопросы. Сеть модифицируется путем добавления и удаления из нее информации. Есть возможность выбирать сложность структуры сети в зависимости от решаемой задачи. Предложенный подход к построению и работе с сетью позволяет использовать ее для текстов на разных языках, в информационных системах с естественно-языковым интерфейсом, для решения задач классификации и поиска информации.

**Ключевые слова:** семантическая сеть, вид вопроса, тип связи, автоматическая генерация, алгоритм поиска ответа.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Потараев В.В., Серебряная Л.В. Автоматическое построение семантической сети для получения ответов на вопросы. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 44-52.

## AUTOMATIC GENERATION OF SEMANTIC NETWORK FOR QUESTION ANSWERING

VICTOR V. POTARAEV, LIYA V. SEREBRYANAYA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 4 March 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** Semantic network model for representing data and knowledge was analysed. Selection of this model for working with text information was justified. The objective of automatic semantic network generation based on an arbitrary Russian-language text was formulated. Initial data, conditions and constraints necessary for network generation algorithm are listed. As a result of the part-of-speech analysis for each word and word order in a sentence, semantic relations between words are determined. The Lexeme dictionary was created to determine the part of speech of words in sentences. A set of question types used in the semantic network was selected. The number of relations in the network is regulated due to the possibility to use only necessary relation types when resolving a specific task. With that, the relations in semantic network can have very different types, which makes it a universal model for representing data and knowledge. The algorithm was developed which allows one to get answers for the questions asked. The semantic network model was generated automatically for the sentences considered. In the proposed algorithm the semantic network is interpreted as unoriented graph on which breadth-first search algorithm is used to find an answer. The proposed algorithms were implemented in a software tool which automatically generates the semantic network for an arbitrary text. The created software tool allows asking questions and getting answers to them based on the information which is stored in the semantic network. The experiments have shown that the generated semantic network gives correct answers to the questions posed. The network is modified by adding and removing information in it. There is a possibility to choose complexity of network structure depending on a specific task being resolved. The proposed approach for building and working with the semantic network allows one to process texts in various languages, to use it in information systems with natural-language interface, and to resolve such tasks as text classification and text search.

**Keywords:** semantic network, question type, relation type, automatic generation, semantic analysis, question answering algorithm.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Potaraev V.V., Serebryanaya L.V. Automatic generation of semantic network for question answering. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 44-52.

### Введение

В современных информационных системах накоплено большое количество текстовой информации. В связи с этим актуальной является автоматизированная обработка текстов. Одним из инструментов, позволяющих обрабатывать текст с учетом его смысла, является семантическая сеть.

Семантическая сеть – это ориентированный граф, который отражает понятия и отношения между ними [1]. Вершины графа содержат понятия, а связи графа – это отношения между понятиями. Типы связей в графе семантической сети выбираются создателем сети в зависимости от конкретных целей [2]. Также отношения в сетях могут быть разных типов: функциональные, количественные, пространственные, временные, логические и др. Широко применяются иерархические семантические сети, имеющие древовидную структуру. Семантическая сеть является моделью, которая чаще всего используется при создании баз знаний [3]. Данная модель может хранить текстовую информацию в узлах сети без привлечения дополнительного хранилища, что упрощает решение задач, связанных с обработкой текстов. Кроме того, такая модель соответствует научным представлениям об организации семантической памяти человека [4].

Семантические сети часто используются в системах искусственного интеллекта и обработки естественного языка, в вопросно-ответных и предметно-ориентированных системах. Примерами таких систем являются *WordNet* и *PyTez*, созданные для обработки англоязычной и русскоязычной информации соответственно [5].

*WordNet* – это лексическая база данных, содержащая словарь и набор семантических сетей. Она применяется для информационного поиска, в работе вопросно-ответных систем и др. Преимущества модели в виде сети: разнообразие видов отношений; поддержка многозначности слов. Недостатки: огромный размер сетей; трудоемкое создание экспертом вручную; слова разных частей речи не связаны между собой; ориентированность на английский язык.

*PyTez* – это словарь русского языка, представляющий собой иерархическую сеть понятий, для которых указаны текстовые выражения. Сеть применяется для информационного поиска, автоматического расширения запроса, автоматической рубрикации и др. Преимущества используемой модели: поддержка многословных понятий; понятие может включать в себя слова разных частей речи; возможность модификации. Недостатки: огромный размер сети; трудоемкое создание экспертом вручную; ориентированность на русский язык.

В современных языках существует большое количество неологизмов, и оно постоянно растет. Некоторые слова получают новый смысл. Из-за этого производится все больше попыток автоматизации создания семантических сетей. При создании сетей используется структурированная и неструктурированная информация [6]. Могут быть использованы словари, тексты на разных языках и машинный перевод [7]. Существует множество автоматически сгенерированных семантических сетей, используемых для различных языков, например *BabelNet* [8].

*BabelNet* – это семантическая сеть, которая сочетает в себе связи из *WordNet* с семантическими отношениями, построенными на основе статей Википедии. Применяется для вычисления семантической близости между понятиями, для определения используемого значения слова и др. Преимущества этой модели сети: автоматическое построение; разнообразие видов отношений; поддержка многозначности слов; поддержка различных языков. Недостатки: огромный размер; в основе лежат связи из *WordNet*, полученные вручную.

Анализ популярных семантических сетей показал, что актуальной остается задача автоматического построения сети с последующим ее использованием.

Целью данной работы является создание алгоритма автоматической генерации семантической сети, которая может быть применена для получения ответов на вопросы на русском языке. Размер и структура сети зависят от решаемой задачи. Созданная сеть может быть использована в системах с естественно-языковым интерфейсом, которые интенсивно развиваются на протяжении нескольких последних десятилетий [9].

### Алгоритм автоматического построения семантической сети

Рассмотрим задачу автоматической генерации семантической сети, используемой для нахождения ответов на вопросы, выраженные на естественном языке.

При решении поставленной задачи предлагается использовать следующие исходные данные:

1. Текст, для которого необходимо построить сеть.
2. Словари частей речи русского языка.
3. Словарь синонимов.
4. Список поддерживаемых видов вопросов.

В русском языке существуют различные виды вопросов – закрытые, открытые, переломные вопросы и др. Предполагается, что построенная семантическая сеть сможет отвечать на открытые вопросы. Примеры таких вопросов: «где?», «как?», «кто?». Типы связей, используемые в семантической сети, зависят от видов вопросов, которые необходимо поддерживать. Кроме того, для построения предложения в ответ на запрос пользователя в семантической сети необходимо наличие связи «подлежащее-сказуемое».

Для корректной работы алгоритма требуется выполнение следующих условий:

1. Типы связей, имеющиеся в семантической сети, позволяют найти ответ на вид вопроса, который поставлен.

2. В тексте отсутствуют многозначные слова.

3. Семантические отношения между словами текста, знание о которых необходимо для ответа на вопрос, можно определить автоматически. Это означает, что в случае применения простейшего алгоритма определения членов предложения в каждом предложении текста подлежащим должно являться существительное в начальной форме, а сказуемым – глагол.

При нахождении основы слова может быть применен один из алгоритмов стемминга, например, алгоритм Портера.

При построении семантической сети будем искать слова, относящиеся к конкретным частям речи. Для определения того, к какой части речи принадлежит слово, можно сравнить основу данного слова с основами слов, чья принадлежность уже установлена. Существуют более универсальные и/или точные способы определения частей речи, но возможностей выбранного подхода достаточно для обработки несложного текста.

Алгоритм построения семантической сети может быть представлен следующим образом:

1. Определить типы связей, необходимые для решения поставленной задачи (в данном случае – для ответа на поддерживаемые виды вопросов).

2. Перейти к очередному предложению текста, начиная с первого.

3. Добавить в сеть связи «подлежащее – сказуемое». В качестве подлежащего можно использовать существительное в начальной форме. В качестве сказуемого – глагол.

4. Добавить в сеть типы связей, определенные на шаге 1.

5. Добавить в сеть связи «слово – основа слова».

6. Добавить в сеть связи типа «синоним», соединяющие основы слов.

7. Повторять шаги 3–6 для каждого предложения до конца текста.

В случае необходимости добавления информации в уже существующую сеть требуется повторять шаги 3–6 для новых предложений.

Для удаления неактуальной или устаревшей информации нужно найти связи, соответствующие предложениям текста с этой информацией, и удалить их из сети. Если при этом появляются узлы, не имеющие связей, то их рекомендуется тоже удалить.

### Пример автоматического построения семантической сети

Даны три предложения: «На стадионе проводится матч», «Из-за матча в городе опустели улицы», «Скоро будет многолюдно». Покажем, что можно построить модель семантической сети, позволяющую отвечать на виды вопросов, перечисленные в табл. 1.

Таблица 1. Виды вопросов  
Table 1. Question types

Вид вопроса Question type	Что выступает в качестве ответа What is an answer	Признак, который можно использовать для поиска ответа Word characteristic which can be used to find the answer
Кто/Что?	Объект, выполняющий действие	Существительное в начальной форме
Где?	Указание места	Пространственный предлог + существительное не в начальной форме
Как?	Указание, каким образом выполнено действие	Наречие образа действия
Из-за чего?	Указание, по какой причине выполняется действие	Предлог «из-за» + существительное не в начальной форме

Пусть списки (словари) заранее известных слов выглядят, как показано в табл. 2.

Рассмотрим определение части речи на примере. Для слова «улица» в словаре существительных при помощи алгоритма стемминга получаем основу «улиц». Для слова

«улице» из предложения «Дождь идет на улице» после удаления окончания «е» получим также основу «улиц». Следовательно, «улице» – это существительное. Аналогичным образом выполняется анализ того, какие суффиксы и окончания могут быть у глаголов.

Для слова «солнечно» в предложении «Завтра будет солнечно» после удаления окончания «о» останется основа «солнечн», которая не совпадает с основой ни одного существительного. Значит, это не существительное. Более того, слово «солнечно» находится в словаре наречий образа действия.

Слова «быть» и «будет» – разные формы одного слова, но при помощи предложенного подхода это определить нельзя. Поэтому слово «будет» добавлено в список глаголов.

**Таблица 2.** Списки заранее известных слов  
**Table 2.** Lists of pre-known words

Вид списка List type	Содержимое списка List contents
Существительные	Дождь, улица, лужа, асфальт
Глаголы	Проводить, опустеть, быть, будет
Пространственные предлоги	В, на (для решения данного примера достаточно знания об одном предлоге)
Причинные предлоги	Из-за (для построения более полной модели семантической сети в данном случае необходимо знание об этом предлоге)
Наречия образа действия	Многолюдно (для решения данного примера достаточно знания об одном наречии)
Словарь синонимов	Матч – игра, улица – дорога

Рассмотрим работу алгоритма автоматического построения семантической сети на примере трех выбранных предложений.

1. Пусть сеть будет использоваться для ответа на вопросы: «Где?», «Как?», «Из-за чего?». Этим вопросам соответствуют типы связей «место», «образ действия», «причина действия».

2. Первое предложение – «На стадионе проводится матч».

3. Подлежащим является существительное в начальной форме «матч», сказуемым – глагол «проводится».

Если в предложении обнаружено несколько подлежащих или сказуемых, то в сети для данного предложения будет несколько связей «подлежащее – сказуемое».

4. Добавим в сеть типы связей, определённые на шаге 1.

а. Место (соответствует вопросу «Где?»).

На данном этапе (согласно табл. 1) надо найти в предложении пару «Пространственный предлог + существительное не в начальной форме». Добавим «на стадионе» в качестве обстоятельства места.

б. Образ действия (соответствует вопросу «Как?»). В этом предложении нет наречий образа действия. Сеть не изменяется.

с. Причина действия (соответствует вопросу «Из-за чего?»). На данном этапе надо найти в предложении пару «Причинный предлог + существительное не в начальной форме». Причинные предлоги в предложении не найдены. Сеть не изменяется.

5. Для существительных и глаголов из предложения получаем основы слов: «на стадионе» – «стадион», «проводится» – «провод», «матч» – «матч». Слово «матч» совпадает со своей основой. Два узла с одинаковым текстом являются избыточными для поиска ответа на вопрос. Поэтому новый узел и связь не добавляются.

6. Используя словарь синонимов, определяем, что слова «матч» и «игра» – синонимы. Получим сеть, представленную на рис. 1.



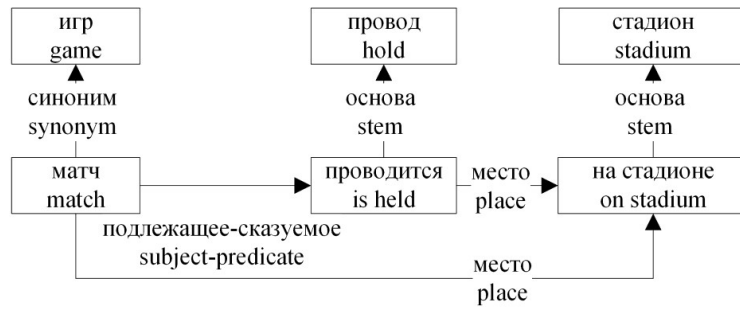


Рис. 1. Пример семантической сети для одного предложения  
Fig. 1. Semantic network example for one sentence

7. Аналогичным образом можно обработать второе предложение «Из-за матча в городе опустели улицы».

Рассмотрим последнее предложение «Скоро будет многолюдно». Существительного из списка в нем нет. В предложение входят глагол «будет» – это сказуемое, а также наречие образа действия «многолюдно» и наречие времени «скоро». Согласно алгоритму, в качестве основы слова «будет» определяется часть «буд» и добавляется в сеть. Слова «скоро» нет в списках известных слов, и оно не было добавлено в сеть в результате какого-либо шага алгоритма. Третье предложение не имеет связей с другими частями сети.

На основании трех предложений получается семантическая сеть, представленная на рис. 2.

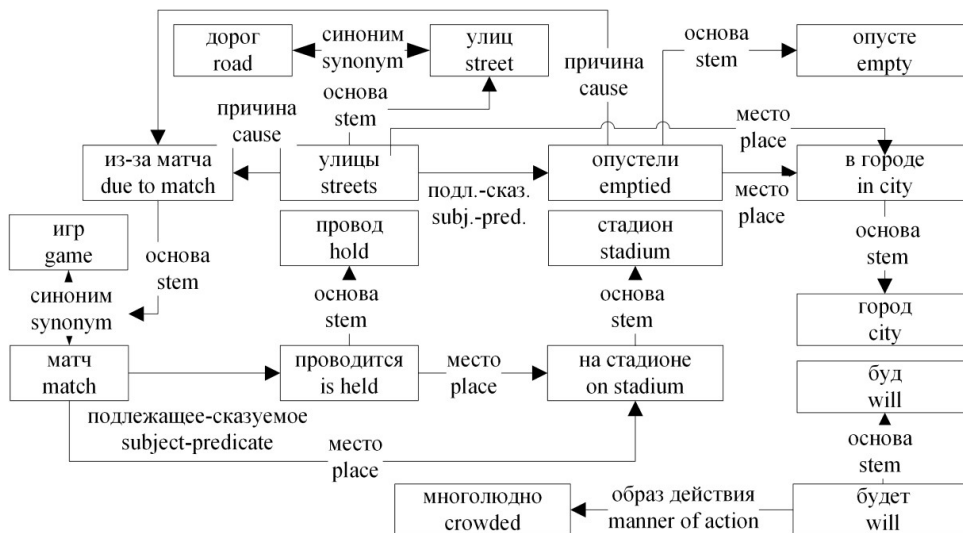


Рис. 2. Семантическая сеть для текста из трех предложений  
Fig. 2. Semantic network for a three-sentence text

### Алгоритм поиска ответа на вопрос

Семантическая сеть, построенная по предложенному выше алгоритму, может быть использована для поиска ответов на поставленные вопросы. Применим алгоритм для нахождения ответа на открытый вопрос. Приведем шаги алгоритма.

1. Найти фрагмент сети, связывающий основы подлежащего и сказуемого вопроса. Составить список соответствующих слов. Если подлежащего или сказуемого нет, то фрагмент состоит из одного слова (главный член предложения, который есть в вопросе).

2. Удалить из списка найденных слов синонимы и повторения разных форм одного слова.

3. В зависимости от типа вопроса выбрать дополнительные слова, связанные нужным типом связи с наибольшим количеством слов найденного фрагмента.

Рассмотрим применение алгоритма для сети, приведенной на рис. 2. Пусть вопрос – «Где проводятся игры?».

1. Подлежащее вопроса – существительное в начальной форме «игры». Основа подлежащего – «игр». Сказуемое – «проводятся», основа которого «провод», есть в сети.

Во время поиска фрагмента сети, соединяющего слова вопроса, неважно, в каком направлении указана связь. Направление используется для определения роли связанных слов и не влияет на тот факт, что слова связаны по смыслу. Поэтому семантическую сеть можно рассматривать как неориентированный граф. Применим для ответа на вопрос алгоритм поиска в ширину. В результате будет найден путь «провод» – «проводится» – «матч» – «игр».

2. В найденном фрагменте сети дублируются слова: синонимы и разные формы одного слова. Для формирования ответа, понятного пользователю, он строится из слов исходного текста. Последовательно анализируем связи между узлами найденного фрагмента сети. В найденном пути первый узел «провод» связан со вторым узлом «проводится» связью «слово – основа слова», поэтому он отбрасывается. У слова «проводится» две связи (с предыдущим и последующим узлами найденного фрагмента), одна из которых – «подлежащее – сказуемое». Слово добавляется в ответ.

У слова «матч» также две связи, одна из которых – «подлежащее – сказуемое», и это слово также добавляется в ответ. Последнее слово «игр» связано с предыдущим словом только связью «синоним» и поэтому отбрасывается.

В результате получим два слова ответа: проводится матч.

3. Вопрос «Где проводятся игры?» подразумевает определение места. Место, связанное со словами найденного фрагмента сети «на стадионе», добавляется в ответ. В результате получен ответ: «Проводится матч на стадионе».

Если для найденного фрагмента сети невозможно определить место, то это означает, что ответ на вопрос не удастся найти.

Аналогичным образом можно показать, что описанный алгоритм позволяет найти ответы на другие вопросы, например:

- 1) «Где опустели улицы?» – «Опустели улицы в городе»;
- 2) «Как будет потом?» – «Будет многолюдно»;
- 3) «Из-за чего улицы опустели?» – «Улицы опустели из-за матча».

Нахождение пути на графе может производиться с применением поиска в ширину, поиска в глубину или другого алгоритма.

### Результаты исследований

Разработанные алгоритмы были реализованы в программном средстве, которое автоматически строит семантическую сеть для произвольного текста. Созданное программное средство позволяет задавать вопросы и получать на них ответы, основанные на информации, хранящейся в семантической сети.

Проверка сети показала, что для рассмотренных примеров, а также для других несложных текстов, она дает верные ответы. В случае обработки текста с новыми словами необходимо лишь расширить списки известных слов, например, на основе словарей русского языка.

Предложенный подход с небольшими изменениями может быть реализован не только для русского языка, но и для других языков. Например, для английского языка при необходимости определения подлежащего стоит учитывать не форму слова, а порядок слов в предложении, однако в целом подход не меняется.

Для поиска ответа на вопрос могут быть использованы и другие модели представления информации, например, искусственные нейронные сети. Однако преимуществом модели семантической сети является ее ориентированность на обработку естественного языка. Она не требует преобразования текстовой информации в другой вид, а также удобна для восприятия человеком. Добавление предложений приводит к расширению сети, и количество сохраняемых предложений не ограничено. Проведенные эксперименты показали, что нахождение ответа на вопрос с применением семантической сети – это хорошо формализуемая и автоматизируемая процедура, а ее результат значительно зависит от способа генерации сети и корректности определения семантических отношений слов.

## Заключение

В работе предложены алгоритмы автоматической генерации семантической сети на основе произвольного текста, а также поиска ответов на заданные вопросы с помощью полученной сети. Алгоритмы предназначены для работы с несложными текстами, где каждый член предложения должен быть представлен предусмотренными частями речи.

Преимуществами предложенного способа генерации модели являются автоматическое построение сети для произвольного текста, а также возможность выбора сложности структуры сети в зависимости от решаемой задачи. Планируется усовершенствование алгоритма за счет увеличения числа видов отношений между понятиями, добавления поддержки многозначных слов, а также обработки текстов на других языках.

Модель семантической сети, предложенная в данной статье, может быть положена в основу работы информационных систем с естественно-языковым интерфейсом. Кроме того, подобные модели нашли свое применение для решения задач классификации и поиска текстовой информации [10].

## Список литературы

1. Гаврилова Т.А. *Базы знаний интеллектуальных систем*. СПб.: Питер; 2000.
2. Рахимова Д.Р. Построение семантических отношений в машинном переводе. *Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия: Математика, механика и информатика*. 2014;80(1):90-101.
3. Овчиева Ю.А. Семантическая сеть – перспективная платформа для системы управления знаниями. *Вестник университета*. 2015;3:14-16.
4. Осипов Г.С. *Методы искусственного интеллекта*. Москва: Физматлит; 2011.
5. Лукашевич Н.В. *Тезаурусы в задачах информационного поиска*. Москва: Издательство МГУ; 2011.
6. Усталов Д.А., Созыкин А.В. Комплекс программ автоматического построения семантической сети слов. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2017;6(2):69-83.
7. Wong W. Ontology Learning from Text: A Look Back and into the Future. *ACM Computing Surveys*. 2012;44(4):20:1-20:36.
8. Navigli R., Ponzetto S.P. BabelNet: The Automatic Construction, Evaluation and Application of a Wide-Coverage Multilingual Semantic Network. *Artificial Intelligence*. 2012;193:217-250.
9. Bouziane A., Bouchiha D., Doumi N., Malki M. Question Answering Systems: Survey and Trends. *Procedia Computer Science*. 2015;73:366-375.
10. Серебряная Л.В., Потараев В.В. Методы классификации текстовой информации на основе искусственной нейронной и семантической сетей. *Информатика*. 2016;52(4):95-103.

## References

1. Gavrilova T.A. [*Knowledge bases of intellectual systems*]. SPb.: Piter; 2000. (In Russ.)
2. Rahimova D.R. [Creation of the semantic relations in machine translation]. *Vestnik KazNU im. al'-Farabi. Seriya: Matematika, mekhanika i informatika=Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science*. 2014;80(1):90-101. (In Russ.)
3. Ovchieva J.A. [Semantic web – a promising platform for knowledge management system]. *Vestnik universiteta= Vestnik universiteta*. 2015;3:14-16. (In Russ.)
4. Osipov G.S. [*Methods of artificial intelligence*]. Moscow: Fizmatlit; 2011. (In Russ.)
5. Lukashevich N.V. [*Thesauruses in information search tasks*]. Moscow: Publishing House of MSU; 2011. (In Russ.)
6. Ustalov D.A., Sozykin A.V. [A Software System for Automatic Construction of a Semantic Word Network]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017;6(2):69-83. (In Russ.)
7. Wong W. Ontology Learning from Text: A Look Back and into the Future. *ACM Computing Surveys*. 2012;44(4):20:1-20:36.
8. Navigli R., Ponzetto S.P. BabelNet: The Automatic Construction, Evaluation and Application of a Wide-Coverage Multilingual Semantic Network. *Artificial Intelligence*. 2012;193:217-250.
9. Bouziane A., Bouchiha D., Doumi N., Malki M. Question Answering Systems: Survey and Trends. *Procedia Computer Science*. 2015;73:366-375.
10. Serebryanaya L.V., Potaraev V.V. [Methods of textual information classification based on artificial neural and semantic networks]. *Informatika=Informatics*. 2016;52(4):95-103. (In Russ.)

### Вклад авторов

Потараев В.В. разработал алгоритм построения семантической сети и алгоритм ответа на вопрос, выполнил экспериментальную проверку разработанных алгоритмов.

Серебряная Л.В. сформулировала задачи, которые необходимо было решить в ходе исследований, а также выполнила анализ и интерпретацию полученных результатов.

### Authors' contribution

Potaraev V.V. developed the algorithm of semantic network generation, the algorithm of question answering, and performed their experimental validation.

Serebryanaya L.V. identified the tasks to be solved during the research, and also participated in the interpretation of their results.

### Сведения об авторах

Потараев В.В., м.т.н., аспирант кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Серебряная Л.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Potaraev V.V., M.Sci., PG student of Information Technologies Software Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Serebryanaya L.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Technologies Software Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-84-93;  
e-mail: L\_silver@mail.ru  
Серебряная Лия Валентиновна

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-84-93;  
e-mail: L\_silver@mail.ru  
Serebryanaya Liya Valentinovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-53-61>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 577.3.043

## ОЦЕНКА ДЕПРЕССИВНОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

СИДОРЕНКО А.В., СОЛОДУХО Н.А.

*Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 12 марта 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Цель работы, результаты которой приведены в рамках статьи, заключалась в исследовании закономерностей изменений нелинейных параметров электроэнцефалограмм (ЭЭГ), представленных фрактальной размерностью, экспонентой самоподобия при облучении оператора электромагнитным шумовым излучением. Вместе с вышеуказанными нелинейными параметрами исследовалось изменение спектральной плотности мощности ритмических составляющих ЭЭГ: дельта-, тета-, альфа-, бета-ритмов. Изучение фрактальной размерности, экспоненты самоподобия и спектральной плотности мощности ЭЭГ при облучении было связано с возможным изменением данных параметров при депрессии и малой депрессии оператора. В качестве облучателя использовался генератор электромагнитного шумового излучения на транзисторах мощностью 30 мВт в диапазоне частот 5 ГГц. В работе приведено описание методов для расчета нелинейных параметров ЭЭГ, представленных фрактальной размерностью и экспонентой самоподобия. Для определения параметров ЭЭГ: фрактальной размерности, экспоненты самоподобия, спектральной плотности мощности ритмических составляющих при достижении поставленной цели было разработано программное обеспечение на языке Java. Проведено изучение научной литературы, связанной с изменением фрактальной размерности, экспоненты самоподобия, спектральной плотности мощности дельта-, тета-, альфа-, бета-ритмов при депрессии и малой депрессии человека. Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась по схеме «10/20» с использованием электроэнцефалографа «Нейрокартограф» фирмы МБН. Анализируемые отведения ЭЭГ: Fp1, Fp2, T3, T4, P3, P4, O1, O2, F3, F4, C3, C4. Результаты работы показали отсутствие четкого депрессивного состояния у оператора при воздействии электромагнитным шумовым излучением, если руководствоваться изменением экспоненты самоподобия, фрактальной размерности и спектральной плотности мощности. Однако при облучении оператора электромагнитным шумовым излучением наблюдалась тенденция изменения параметров, характерная для малой депрессии.

**Ключевые слова:** излучение, шум, электроэнцефалограмма, депрессия, человек.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Сидоренко А.В., Солодухо Н.А. Оценка депрессивного состояния оператора мобильных технических систем под воздействием электромагнитного шумового излучения. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 53-61.

## EVALUATION OF THE DEPRESSIVE STATE OF MOBILE TECHNICAL SYSTEMS OPERATOR SUBJECTED TO ELECTROMAGNETIC NOISE RADIATION

ALEVTINA V. SIDORENKO, NIKITA A. SALADUKHA

*Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 12 March 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** This paper presents the results of the work aimed at a study of the patterns of changes in the nonlinear electroencephalogram (EEG) parameters, including fractal dimension and self-similarity exponent, when the operator is irradiated with electromagnetic noise radiation. Together with the above-mentioned nonlinear parameters, a change in the spectral power density of the rhythmic components in EEG (delta-, theta-, alpha-, and beta-rhythms) has been studied. Investigation of the fractal dimension, self-similarity exponent, and spectral power density during irradiation was associated with possible changes of the parameters in the case of operator's depression or minor depression. The radiation source was represented by a transistor electromagnetic-noise generator with the power of 30 mW operating over the frequency range of 5 GHz. The methods for calculation of the nonlinear parameters including fractal dimension and self-similarity exponent have been described. To realize the principal objectives of the work, the Java-based software was developed. The relevant literature demonstrating the changes in fractal dimension, self-similarity exponent, spectral power density of the delta-, theta-, alpha-, beta-rhythms in the case of depression and minor depression has been reviewed. Electroencephalograms were registered according to the "10/20" scheme using the MBN Neurocartograph electroencephalograph. The analyzed leads were Fp1, Fp2, T3, T4, P3, P4, O1, O2, F3, F4, C3, C4. As shown by the results of this work, there is no distinct depressive state of the operator exposed to electromagnetic noise radiation, judging by changes in the self-similarity exponent, fractal dimension, and spectral power density. However, when the operator was irradiated with electromagnetic noise radiation, the observed tendency in variation of the parameters was characteristic for minor depression.

**Keywords:** radiation, noise, electroencephalogram, depression, human.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Sidorenko A.V., Saladukha M.A. Evaluation of the depressive state of mobile technical systems operator subjected to electromagnetic noise radiation. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 53-61.

### Введение

Воздействие электромагнитного излучения на организм человека может привести к различным эффектам, включая позитивные, нейтральные, негативные. Среди позитивных эффектов присутствуют: стимуляция регенерации и восстановления тканей; ускорение формирования костной ткани и хряща; снижение бактериальной активности и уменьшение количества патогенов в ране; обогащение крови кислородом; снижение симптомов рассеянного склероза; увеличение антиоксидантной защиты; увеличение внимания; улучшение когнитивной активности; снижение времени реакции.

Среди нейтральных эффектов выделяются: ускорение глюкозного метаболизма; изменение вязкости крови; дифференциация мезенхимальных стволовых клеток кости человека; изменение активности антиоксидантных энзимов; изменение уровня мелатонина в плазме крови; изменение спектральной асимметрии ЭЭГ сигнала; сокращение времени засыпания и увеличение второй фазы сна; увеличение проницаемости гемато-энцефалического барьера; увеличение количества дельта- и тета-частотных импульсов в передних и центральных отведениях ЭЭГ.

Среди негативных эффектов влияния электромагнитного излучения фигурирует онкогенез, производство свободных радикалов в облучаемых тканях, увеличение проводимости мембраны, что, в свою очередь, приводит к сокращению времени выживания клетки [1].

Среди видов онкологии, которые могут быть вызваны облучением электромагнитным излучением, присутствуют миелоидная лейкемия, опухоли головного мозга, лимфома. Облучение также может вызывать или способствовать развитию болезни Паркинсона, мигрени [2].

При функционировании мобильных технических систем для защиты обрабатываемой информации от несанкционированного доступа оператор, осуществляющий обработку, формирование и передачу информации, оказывается под воздействием электромагнитного шумового излучения. Исследование воздействия электромагнитного шумового излучения на центральную нервную систему проводилось в работах [3–5]. Показано, что под действием генератора электромагнитного шума наблюдается активизация процессов в мозге [5], увеличивается когнитивная нагрузка, присутствует скрытая тревога [3]. Однако подробное описание влияния этого излучения на наличие депрессивного состояния оператора ранее не проводилось.

Целью работы является определение, испытывает ли оператор депрессивное состояние под воздействием генератора электромагнитного шума с использованием в качестве анализируемых линейных и нелинейных количественных параметров электроэнцефалограммы: спектральной плотности мощности, фрактальной размерности и экспоненты самоподобия.

В процессе исследований была измерена спектральная плотность мощности дельта-, тета-, альфа-, бета-ритмов в передней (отведения Fp1, Fp2, F3, F4), височной (отведения T3, T4), теменной (отведения P3, P4), центральной (отведения C3, C4) и затылочной (отведения O1, O2) областях головы. При оценке спектральной плотности мощности в какой-либо области головного мозга использовалось усреднение спектральных плотностей мощности электроэнцефалограмм отведений, связанных с этой областью головы. Фрактальная размерность измерялась в электроэнцефалограммах отведений Fp1, Fp2, T3, T4, P3, P4, O1, O2. Экспонента самоподобия измерялась в электроэнцефалограммах отведений F3, F4, C3, C4, T3, T4, O1, O2, P3, P4.

### Методы анализа электроэнцефалограмм

Электроэнцефалограмму можно рассматривать как некоторый временной ряд записи потенциалов мозга. В связи с этим для расчета фрактальной размерности  $D$  электроэнцефалограммы можно использовать метод Хигучи, который является одним из методов нелинейной динамики.

*Метод Хигучи.* Алгоритм метода вычисления фрактальной размерности  $D$  временного ряда  $x$ , содержащего  $N$  элементов, включает следующие этапы.

1. Создание новых временных рядов. Из заданного временного ряда  $x$  создаются новые временные ряды  $x_i^m$ , определяемые следующим образом:

$$x_i^m; x(m), x(m+k), x(m+2k) \dots, x\left(m + \left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor \cdot k\right) \quad (m=1, 2 \dots k), \quad (1)$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  означает целую часть числа,  $k$  и  $m$  – целые числа, причем  $m$  означает начальное время, а  $k$  – временной интервал между соседними значениями ряда. Для времени интервала, равного  $k$ , получается  $k$  наборов новых временных рядов. В случае  $k=3$  и  $N=100$  три временных ряда, полученных таким образом, описываются:

$$\begin{aligned} x_3^1; & x(1), x(4), x(7), \dots, x(97), x(100), \\ x_3^2; & x(2), x(5), x(8), \dots, x(98), \\ x_3^3; & x(3), x(6), x(9), \dots, x(99). \end{aligned} \quad (2)$$

2. Вычисление длины каждого нового ряда. Длина кривой  $x_i^m$ , обозначенная как  $L_m(k)$ , определяется следующим образом:

$$L_m(k) = \left\{ \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} |X(m+ik) - X(m+(i-1) \cdot k)| \right\} \frac{N-1}{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor \cdot k} \quad (3)$$

Дробь  $\frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right]} \cdot k$  представляет собой нормировочный коэффициент для длины кривой поднабора

временных рядов. Усреднение  $L_m(k)$ , проводимое по всем  $m$  от 1 до  $k$ , дает  $L_{cp}$ .

3. Построение графика  $L_{cp} = f(k)$ . Строится график функции средней длины кривой за временной интервал  $L_{cp}$  в функции  $k$  в двойном логарифмическом масштабе. Если соблюдается соотношение  $L_{cp} \approx k^{-D}$ , тогда кривая является фракталом с размерностью  $D$ .

4. Вычисление модуля тангенса угла наклона графика. Вычисляется модуль значения тангенса угла наклона графика функции  $L_{cp}$  в функции  $k$  в двойном логарифмическом масштабе, что дает значение фрактальной размерности исходного временного ряда  $x$  [6, 7].

*Метод флуктуационного анализа с исключенным трендом (DFA)*. Экспонента самоподобия  $h$  некоторого временного ряда  $v(i)$ , где  $i$  изменяется от 1 до  $N$ , вычисляется с использованием метода флуктуационного анализа с исключенным трендом следующим образом. Алгоритм вычисления сводится к следующему. Определяется квадрат каждого значения временного ряда:

$$x(i) = v^2(i), \quad 1 \leq i \leq N. \quad (4)$$

Далее от каждого элемента временного ряда  $x(i)$  вычитается среднее значение всего временного ряда  $X$  и производится суммирование:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (x(i) - \langle x \rangle), \quad 1 \leq k \leq N, \quad (5)$$

где  $\langle x \rangle$  – среднее значение временного ряда  $X$  в диапазоне  $[1, N]$ . Затем ряд  $Y$  разбивается на сегменты длиной  $n$  ( $n$  – временной масштаб наблюдения). Для каждого из этих сегментов с помощью метода наименьших квадратов определяется локальный тренд  $y_n$ . Определяется среднеквадратичное отклонение между  $y(k)$  и  $y_n(k)$  в диапазоне  $[1, N]$ :

$$F(n) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - y_n(k))^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

В дальнейшем вычисление  $F(n)$  проводится для различных значений масштаба  $n$  (чаще всего вычисления проводят для диапазона  $n \in [4; N/4]$ ). Финальным шагом является построение зависимости значения преобразования  $F(n)$  от  $n$  в логарифмическом масштабе. Тангенс угла наклона данной зависимости  $\log(F(n)) / \log(n)$  и дает значение экспоненты самоподобия, так как выполняется соотношение  $F(n) \approx n^h$  [8].

### Методика проведения исследований

Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась по схеме «10/20» с использованием электроэнцефалографа «Нейрокартограф» фирмы МБН. Обработка и анализ электроэнцефалограмм проводились в разработанной авторами информационно-измерительной системе, адаптированной для работы с электроэнцефалограммами [9]. Объектом исследований являлись электроэнцефалограммы следующих отведений: Fp1, Fp2, T3, T4, P3, P4, O1, O2, F3, F4, C3, C4. Анализ электроэнцефалограмм проводился в следующих областях головы: передняя (отведения Fp1, Fp2, F3, F4), височная (отведения T3, T4), теменная (отведения P3, P4), центральная (отведения C3, C4) и затылочная (отведения O1, O2). Электроэнцефалограммы обрабатывались в следующих режимах: фон, наличие генератора электромагнитного шумового излучения. В фоне использовались электроэнцефалограммы здорового человека. Спектральная плотность мощности ритмов головного мозга рассчитывалась с помощью быстрого преобразования Фурье. Анализируемые диапазоны включали: альфа-ритм (8–12 Гц), бета-ритм (12–20 Гц), тета-ритм (4–8 Гц), дельта-ритм (0–4 Гц). При оценке спектральной плотности мощности в какой-либо области головы использовалось усреднение спектральных плотностей мощности электроэнцефалограмм отведений, связанных с этой областью головы. Фрактальная размерность измерялась методом Хигучи, а экспонента самоподобия – методом флуктуационного анализа с исключенным трендом [10].



## Результаты и их обсуждение

Исследованы вариации спектральной плотности мощности в различных областях головы. Значения спектральной плотности мощности в передней области головы были получены усреднением значений спектральной плотности мощности ритмов электроэнцефалограмм в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, в височной области головы – усреднением значений спектральной плотности мощности ритмов электроэнцефалограмм в отведениях T3 и T4, в теменной области головы – усреднением значений спектральной плотности мощности ритмов электроэнцефалограмм в отведениях P3 и P4, в центральной области головы – усреднением значений спектральной плотности мощности ритмов электроэнцефалограмм в отведениях C3 и C4, в затылочной области головы – усреднением значений спектральной плотности мощности ритмов электроэнцефалограмм в отведениях O1 и O2.

В передней области головы при анализе электроэнцефалограмм спектральная плотность мощности альфа-ритма при наличии генератора шума оказалась на 90,8 % выше фона, бета-ритма – в 2,5 раза больше фонового значения, тета-ритма – на 54,6 % больше фона, спектральная плотность мощности дельта-ритма электроэнцефалограмм оказалась на 29,4 % меньше фона (рис. 1, *a*).

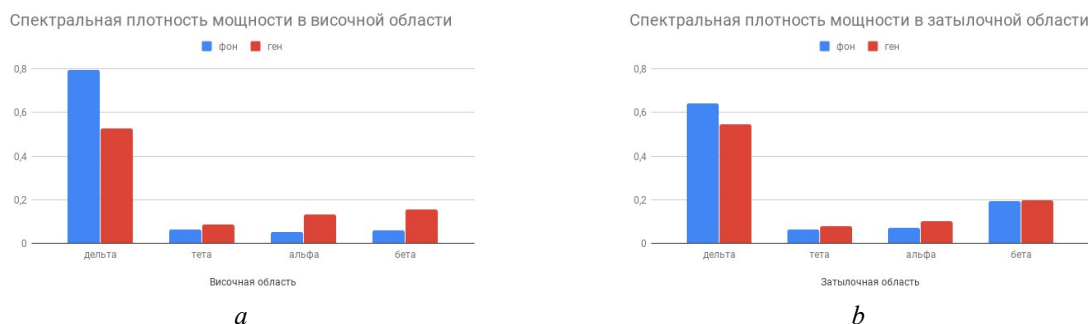
В центральной области головы спектральная плотность мощности альфа-ритма электроэнцефалограмм при наличии генератора шума оказалась на 74,3 % выше фона; бета-ритма – в 2,2 раза больше фонового значения; тета-ритма – на 26,6 % больше фона, спектральная плотность мощности дельта-ритма оказалась на 39,1 % меньше фона (рис. 1, *b*).



**Рис. 1.** Гистограммы распределения спектральной плотности мощности в разных областях головы при наличии излучения генератора шума: *a* – передняя область; *b* – центральная область  
**Fig. 1.** Power spectral density distributions histograms in different brain regions with noise generator radiation: *a* – frontal; *b* – central

В височной области головы спектральная плотность мощности альфа-ритма электроэнцефалограмм при наличии генератора шума оказалась в 2,6 раза выше фона, бета-ритма – в 2,7 раза больше фонового значения, тета-ритма – на 36,1 % больше фона.

В затылочной области головы спектральная плотность мощности альфа-ритма электроэнцефалограмм при наличии генератора шума оказалась на 40,9 % выше фона, бета-ритма – на 2,2 % больше фонового значения, тета-ритма – на 31,1 % больше фона; спектральная плотность мощности дельта-ритма оказалась на 14,8 % меньше фона (рис. 2, *b*).



**Рис. 2.** Гистограммы распределения спектральной плотности мощности в разных областях головы при наличии излучения генератора шума: *a* – височная область; *b* – затылочная область  
**Fig. 2.** Power spectral density distributions histograms in different brain regions with noise generator radiation: *a* – temporal; *b* – occipital

В теменной области головы спектральная плотность мощности альфа-ритма при наличии генератора шума оказалась на 49,6 % выше фона, бета-ритма – на 62,7 % больше фонового значения, тета-ритма – на 24 % больше фона, спектральная плотность мощности дельта-ритма оказалась на 29,6 % меньше фона (рис. 3).

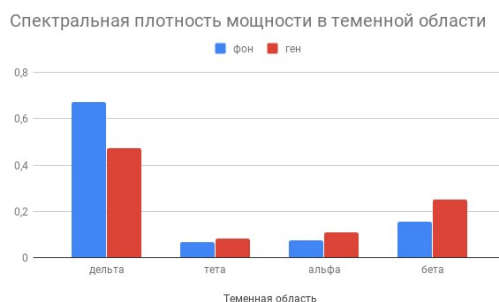


Рис. 3. Гистограммы распределения спектральной плотности мощности в теменной области головы при наличии излучения генератора шума

Fig. 3. Power spectral density distributions histograms in parietal brain region with noise generator radiation

Изменения спектральной плотности мощности дельта-, тета-, альфа-, бета-ритмов электроэнцефалограмм в различных областях головы при депрессии показаны на рис. 4 [11].

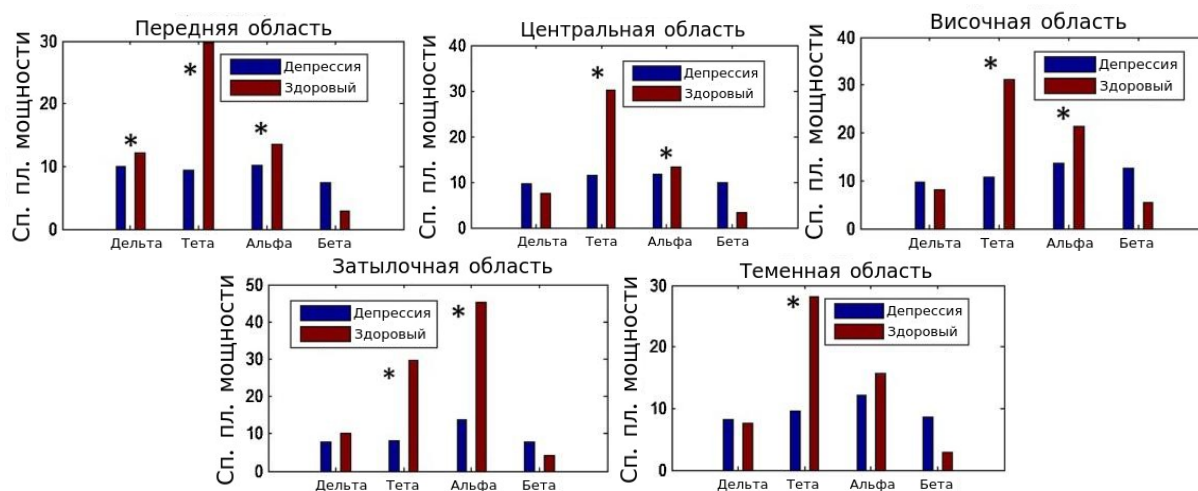


Рис. 4. Гистограммы распределения спектральной плотности мощности при депрессии относительно фонового (здорового) состояния в разных областях головы: передняя, центральная, височная, затылочная, теменная [11]

Fig. 4. Power spectral density distributions histograms in different brain regions in depression compared to background (healthy) state in different brain regions: frontal, central, temporal, occipital, parietal [11]

При наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности тета-ритма и альфа-ритма электроэнцефалограмм возрастает на всей поверхности головы (это 10 гистограмм: в передней области 2 гистограммы (тета-ритм, альфа-ритм); в центральной области 2 гистограммы (тета-ритм, альфа-ритм); в височной области 2 гистограммы (тета-ритм, альфа-ритм); в затылочной области 2 гистограммы (тета-ритм, альфа-ритм); в теменной области 2 гистограммы (тета-ритм, альфа-ритм)). Противоположная тенденция характерна для депрессии (тета-ритм и альфа-ритм снижаются при депрессии по всей поверхности головы). В височной и теменной области дельта-ритм уменьшался при наличии генератора шума (это 2 гистограммы: дельта-ритм в височной области и дельта-ритм в теменной области). Для депрессии характерной является противоположная тенденция (при депрессии дельта-ритм возрастает в височной и теменной областях). Дельта-ритм электроэнцефалограмм в центральной области головы падает при наличии генератора шума, а при депрессии – возрастает (1 гистограмма).

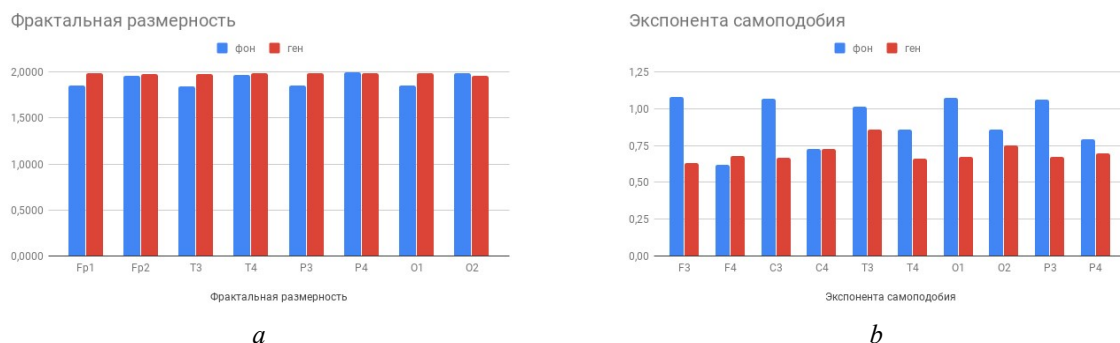
В остальных случаях изменение спектральной плотности мощности электроэнцефалограмм при наличии генератора шума совпадает с тенденцией изменения спектральной плотности мощности при депрессии (это 7 гистограмм: дельта-ритм в передней области и затылочной области падает (2 гистограммы), бета-ритм по всей поверхности головы возрастает (5 гистограмм)).

Резюмируя, можно сказать, что тринадцать гистограмм вариаций спектральной плотности мощности при наличии генератора шума противоположны гистограммам при депрессии, а 7 гистограмм совпадают. Если руководствоваться данными из рис. 1–4 и [11], можно сказать, что человек при наличии излучения генератора шума депрессию не испытывает.

Фрактальная размерность электроэнцефалограмм под действием генератора электромагнитного шума изменялась следующим образом (рис. 5). В отведении Fp1 значение фрактальной размерности выросло на 7,3 % от фонового значения, в отведении Fp2 – выросло на 1,3 %; в отведении T3 – выросло на 7,4 %, в отведении T4 – выросло на 0,8 % от фона, в отведении P3 – выросло на 7 %, в отведении P4 – снизилось на 0,4 % от фона, в отведении O1 – выросло на 7,3 %, в отведении O2 – снизилось на 1,2 % от фона (рис. 5, а). В работе [10] отмечается, что при депрессии в электроэнцефалограммах отведений Fp1, Fp2, T3, T4, P3, P4, O1, O2 наблюдается рост фрактальной размерности. Это позволяет сделать предварительное заключение (т. е. заключение, основанное на данных рис. 5, а и [12]), что человек под воздействием генератора шума депрессию испытывает.

Экспонента самоподобия электроэнцефалограмм под воздействием генератора электромагнитного шума изменялась следующим образом (рис. 5, б). В отведении F3 она снизилась на 41,4 % от фонового значения, в отведении F4 – выросла на 9,5 % от фона, в отведении C3 – уменьшилась на 37,6 %, в отведении C4 – выросла на 0,4 %, в отведении T3 – снизилась на 15,3 %, в отведении T4 – упала на 23 % от фона, в отведении O1 – уменьшилась на 37,3 %, в отведении O2 падение составило 13 % от фона, в отведении P3 – уменьшилась на 36,8 %, в отведении P4 – упала на 12,2 % от фона.

При депрессии, как показано в работе [13], наблюдается возрастание экспоненты самоподобия в электроэнцефалограммах отведений F3, F4, C3, C4, T3, T4, O1, O2. Это позволяет сделать предварительное заключение (т. е. заключение, основанное на данных рис. 5, б и [11]), что человек под воздействием генератора шума депрессию не испытывает. Однако при малой депрессии (депрессивное состояние, не достигающее по тяжести и/или по формальным диагностическим критериям до диагноза «депрессия») наблюдается падение экспоненты самоподобия в отведениях F3, F4, C3, C4, O1, O2, P3, P4 [14]. Это позволяет сделать вывод, что в условиях излучения электромагнитного шума оператор находится в состоянии малой депрессии.



**Рис. 5.** Гистограммы распределения под действием излучения генератора электромагнитного шума:  
а – фрактальная размерность; б – экспонента самоподобия  
**Fig. 5.** Distribution histograms with noise generator radiation:  
а – fractal dimension; б – self-similarity exponent

## Заключение

Проведен комплекс экспериментальных исследований электроэнцефалограмм отведений Fp1, Fp2, T3, T4, P3, P4, O1, O2, F3, F4, C3, C4 при действии электромагнитного шумового излучения. Изменение количественных параметров позволяет сделать вывод о том, что человек под действием излучения генератора электромагнитного шума не находится в состоянии депрессии, но находится в малой депрессии. Количественными параметрами, которые использовались для оценки того, находится ли оператор в состоянии депрессии, являлись: спектральная плотность мощности тета-, дельта-, альфа-, бета-ритмов, фрактальная размерность, экспонента самоподобия. Тенденция изменения 13 гистограмм распределения спектральной плотности мощности электроэнцефалограмм при наличии генератора шума противоположна той, что наблюдается при депрессии, а в 7 гистограммах совпадает [11]. При депрессии наблюдается рост фрактальной размерности в анализируемых отведениях Fp1, Fp2, T3, T4, P3, P4, O1, O2; фрактальная размерность большинства электроэнцефалограмм анализируемых отведений возрастает при наличии генератора шума, что позволяет сделать предварительное заключение (т. е. заключение, основанное только на изменении фрактальной размерности) о наличии депрессии при воздействии электромагнитного шумового излучения [12]. Однако экспонента самоподобия электроэнцефалограмм при наличии генератора электромагнитного шума уменьшается в отведениях F3, C3, T3, T4, O1, O2. Противоположная тенденция (рост экспоненты самоподобия в электроэнцефалограммах отведений F3, F4, C3, C4, T3, T4, O1, O2) наблюдается и при депрессии [13]. Для оценки того, находится ли оператор в состоянии малой депрессии, использовалась экспонента самоподобия. Она падает в отведениях F3, F4, C3, C4, O1, O2, P3, P4 при малой депрессии [14], эта же тенденция (падение экспоненты самоподобия в отведениях F3, C3, O1, O2, P3, P4) наблюдается при наличии генератора электромагнитного шума.

Резюмируя, можно сказать, что под действием генератора электромагнитного шума человек не находится в состоянии депрессии (спектральная плотность мощности и экспонента самоподобия отрицают наличие депрессии, фрактальная размерность подтверждает наличие депрессии), но находится в состоянии малой депрессии.

## Список литературы/References

1. Markovà E., Malmgren L.O.G., Belyaev I.Y. Microwaves from mobile phones inhibit 53BP1 focus formation in human stem cells stronger than in differentiated cells: possible mechanistic link to cancer risk. *Environ. Health Perspect.* 2010;118:394-399. DOI: 10.1289/ehp.0900781.
2. Terzi M., Ozberk B., Deniz O.G., Kaplan S. The role of electromagnetic fields in neurological disorders. *J Chem Neuroanat., Part B.* 2016;75:77-84. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2016.04.003.
3. Sidorenko A.V., Saladukha M.A. Assessing the effect of electromagnetic noise radiation on the central nervous system using non-linear parameters of the electroencephalogram. *Nonlinear Dynamics and Applications.* 2019;25:231-240.
4. Sidorenko A.V., Solodyhuo N.A. [Emotion state of operator subjected by electromagnetic noise radiation]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2019;4:5-10. (In Russ.) Сидоренко А.В., Солодухо Н.А. Эмоциональное состояние оператора при воздействии электромагнитного шумового излучения. *Доклады БГУИР.* 2019;4:5-10.
5. Sidorenko A.V., Solodyhuo N.A. [Nonlinear analysis of operator electroencephalograms subjected by electromagnetic noise radiation]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2017;6:69-75. (In Russ.) Сидоренко А.В., Солодухо Н.А. Нелинейный анализ электроэнцефалограмм оператора при действии электромагнитного шумового излучения. *Доклады БГУИР.* 2017;6:69-75.
6. Harne B.P. Higuchi Fractal Dimension Analysis of EEG Signal before and after OM Chanting to Observe Overall Effect on Brain. *IJECE.* 2014;4(4):585-592. DOI: 10.11591/ijece.v4i4.5800.
7. Sidorenko A.V. Neurointerface: its operation principles and realizations. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2016;7:106-110. (In Russ.) Сидоренко А.В. Нейроинтерфейс: принципы действия и реализации. *Доклады БГУИР.* 2016;7:106-110.
8. Golinska A.K. Detrended Fluctuation Analysis (DFA) in biomedical signal processing: selected examples. *SLGR.* 2012;29(42):107-115.
9. Sidorenko A.V. [Metody informacionnogo analiza bioelektricheskikh signalov]. Minsk: BGU; 2003. (in Russ.)

- Сидоренко А.В. *Методы информационного анализа биоэлектрических сигналов*. Минск: БГУ; 2003.
10. Sidorenko A.V. Assessment of the operator well-being in conditions electromagnetic noise radiations. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;7:118-122. (In Russ.) Сидоренко А.В. Оценка состояния оператора в условиях электромагнитных шумовых излучений. *Доклады БГУИР*. 2018;7:118-122.
  11. Wajid Mumtaz. Electroencephalogram (EEG)-based computer-aided technique to diagnose major depressive disorder (MDD). *Biomedical Signal Processing and Control*. 2017;31:108-115. DOI: 10.1016/j.bspc.2016.07.006.
  12. Maie Bachmann. Spectral Asymmetry and Higuchi's Fractal Dimension Measures of Depression Electroencephalogram. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2013;2013(1394): 251638-1-251638-8. DOI: 10.1155/2013/251638.
  13. Lee J.S. Detrended fluctuation analysis of resting EEG in depressed outpatients and healthy controls. *Clinical Neurophysiology*. 2007;118:2489-2496. DOI: 10.1016/j.clinph.2007.08.001.
  14. Xavier Bornas. Long range temporal correlations in EEG oscillations of subclinically depressed individuals: their association with brooding and suppression. *Cogn Neurodyn*. 2015;9(1):53-62. DOI: 10.1007/s11571-014-9313-1.

### Вклад авторов

Сидоренко А.В. определила задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, обосновала методику проведения эксперимента для определения параметров электроэнцефалограмм, участвовала в интерпретации результатов исследований, связанных с определением состояния оператора

Солодухо Н.А. предложил методы для анализа электроэнцефалограмм, полученных в процессе эксперимента при воздействии электромагнитных шумовых излучений, разработал программное обеспечение для эксперимента на языке Java, принимал участие в интерпретации результатов исследования.

### Authors' contribution

Sidorenko A.V. has identified the tasks to be solved during the research, justified methods for experiments to define the parameters of electroencephalograms and participated in the interpretation of the research results.

Saladukha N.A. has proposed the methods for analyzing electroencephalograms obtained through an experiment when exposed by electromagnetic noise radiation, developed the software in Java and participated in the interpretation of the research results.

### Сведения об авторах

Сидоренко А.В., д.т.н., профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий факультета радиопизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета.

Солодухо Н.А., м.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры телекоммуникаций и информационных технологий факультета радиопизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета.

### Information about the authors

Sidorenko A.V., D.Sci., Professor of Physics and aerospace technology Department of Radiophysics and computer technologies faculty of Belarusian State University.

Saladukha M.A., master of physics and mathematics, Senior Teacher of Telecommunication and Information Technology Department of Radiophysics and computer technologies faculty of Belarusian State University.

### Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,  
Минск, пр-т Независимости, 4,  
Белорусский государственный университет  
тел. +375-29-339-14-30;  
e-mail: sidorenkoA@yandex.ru  
Сидоренко Алевтина Васильевна

### Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosty ave., 4,  
Belarusian State University  
tel. +375-29-339-14-30;  
e-mail: sidorenkoA@yandex.ru  
Sidorenko Alevtina Vasiljevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-62-70>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.372.5

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ МНОГОПОЛОСНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ВНУТРИПОЛОСТНОГО КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ СООТВЕТСТВИЯ ИДЕАЛЬНОМУ ФИЛЬТРУ

ШАШОК В.Н., КОНОПЛИЦКИЙ А.С.

*Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 30 марта 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** В статье приводится методика структурно-параметрического синтеза многополосных частотно-избирательных цепей. Дается краткая характеристика подходов для решения задач синтеза многополосных частотно-избирательных цепей, основанных на использовании многочастотных резонаторов, частотных преобразований и параметрических, использующих численные процедуры оптимизации. Представлены и дается краткое описание трех широко используемых критериев оценки характеристик частотно-избирательных цепей: по Тейлору, чебышевский и среднестепенной. Показаны способы оценки совместного приближения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик синтезируемых цепей к характеристикам идеального фильтра. Предложен критерий и приведена методика структурно-параметрического синтеза многополосных согласующих цепей на основе внутриполостного комплексного критерия соответствия идеальному фильтру в полосе пропускания и межполосного чебышевского критерия, реализуемая численной оптимизацией синтезируемых цепей относительно выбранного критерия близости. При этом многополосная цепь представляется в виде лестничного соединения, состоящего в общем случае из  $n$  различных реактивных сопротивлений. Приводится пример использования предложенной методики для решения задачи структурно-параметрического синтеза двухполосной согласующей цепи. В качестве согласуемой нагрузки выбран эквивалент первого типа, состоящий из последовательного соединения активного сопротивления и емкости. В примере в качестве дополнительного применено требование по обеспечению межполосной частотной избирательности. Такое требование обеспечивается введением нуля в функцию передачи синтезируемой цепи на межполосной средней геометрической частоте. Его реализация выполнена введением параллельного колебательного контура в первую последовательную ветвь синтезируемой согласующей цепи. Структурно-параметрический синтез выбранной в примере двухполосной согласующей цепи осуществляется с применением программного продукта Mathcad 15 на основе встроенного метода оптимизации Левенберга – Марквардта.

**Ключевые слова:** структурно-параметрический синтез, многополосные согласующие цепи, комплексный критерий.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Шашок В.Н., Коноплицкий А.С. Методика определения структуры и параметров многополосных согласующих цепей на основе внутриполостного комплексного критерия соответствия идеальному фильтру. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 62-70.

## PROCEDURE OF DEFINITION OF STRUCTURE AND PARAMETERS OF MULTI-BAND MATCHING CIRCUITS ON THE BASIS OF INTRACAVITARY COMPLEX CRITERION FOR CONFORMITY TO THE IDEAL FILTER

VIKTOR N. SHASHOK, ANDREI S. KANAPLIZKI

*Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Belarus)*

*Submitted 30 March 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The article gives the procedure of structurally parametric synthesis of multi-band frequency-selective circuits. A short characteristic of approaches to solve the problems of synthesis of the multi-band frequency-selective circuits based on the use of multifrequency resonators, frequency transformations and parametric transformations using numerical procedures of optimisation is given. The research presents a short description of three widely used estimation criteria of the characteristics of frequency-selective circuits: Taylor, Chebyshev and average-degree criteria. Expedients of an estimate of joint approximation of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of synthesized circuits to those of the ideal filter are shown. The criterion is suggested and the procedure is presented for structurally parametrical synthesis of multi-band matching circuits on the basis of intracavity complex criterion of conformity to the ideal filter in a transmission band and interband Chebyshev criterion realized by numerical optimization of synthesized circuits relative to the chosen criterion for affinity is given. With that, the multi-band circuit is represented in form of a ladder-type connection that, generally, consists of  $n$  different reactive resistances. The example of using the proposed procedure to solve the problem of structurally parametric synthesis of a two-band matching circuit is given. As a matching load we selected the first-type equivalent consisting of a serial connection of active resistance and capacity. In the example there is an additional requirement to ensuring interband frequency selectivity. Such requirement is ensured by introducing zero to the function of transmission of the synthesized circuit on an interband average geometric frequency. The requirement is implemented by introducing a parallel oscillating circuit to the first serial arm of the synthesized circuit. The structurally parametric synthesis of the two-band matching circuit selected in the example is carried out through Mathcad 15 software based on the integrated method of Levenberg-Marquardt optimization.

**Keywords:** Structurally parametric synthesis, multi-band matching circuits, complex criterion.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interest.

**For citation.** Shashok V.N., Kanaplizki A.S. Procedure of definition of structure and parameters of multi-band matching circuits on the basis of intracavity complex criterion for conformity to the ideal filter. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 62-70.

### Введение

Современные радиотехнические системы для обеспечения высокой помехоустойчивости и требуемой пропускной способности в соответствии с принятыми международными нормами все чаще используют многополосный режим работы. Например, в современных системах сотовой связи, работающих в режиме 3G/UMTS, используются диапазоны 1920–1980 МГц и 2110–2170 МГц, а также поддерживаются частоты сетей 2G, т. е. GSM 890–915 МГц и 935–960 МГц [1]. Приемо-передающие тракты многополосных систем связи должны обеспечивать качественный прием одновременно во всех используемых диапазонах. Кроме того, применение в таких системах сложных сигналов требует сохранения их частотной структуры многополосными частотно-избирательными цепями [2]. По этим причинам разработка для таких систем многополосных фильтров и согласующих цепей представляет собой сложную инженерную задачу и имеет большую практическую значимость.

## Выбор критерия структурно-параметрического синтеза многополосных частотно-избирательных цепей

Существует несколько подходов для решения задач синтеза многополосных частотно-избирательных цепей: методы синтеза, основанные на применении теории многочастотных резонаторов [3]; методы, основанные на применении частотных преобразований [4]; параметрические (структурно-параметрические) методы, использующие численные процедуры оптимизации [5]. Подходы первого метода предполагают синтез многополосных цепей на основе применения теории расчета мультимодальных резонаторов. Однако такой подход используется только для синтеза СВЧ цепей. Кроме того, увеличение порядка синтезируемых цепей приводит к значительному возрастанию трудностей при их реализации [1]. Методы второго типа осуществляют приведение фильтра нижних частот к многополосной структуре процедурой замены частотной переменной. Аналитический подход позволяет решить данную задачу математически точно и обеспечить простоту решения задачи. Применение фильтра-прототипа удобно при синтезе фильтров, а также согласовании простых нагрузок. Такой подход с использованием прототипа требует преобразования к низкочастотной форме согласуемой нагрузки, что не всегда является удобным и реализуемым для сложных нагрузок. Кроме того, с увеличением числа полос пропускания значительно возрастает сложность таких преобразований. По этой причине указанный подход, как правило, используется только для симметричных преобразований.

В настоящее время с широким использованием вычислительной техники в задачах синтеза большое внимание уделяется развитию параметрических методов, связанных с синтезом оптимальных частотно-избирательных цепей. Под оптимальной для заданной многополосной спецификации понимается согласующая цепь, обеспечивающая с заданной точностью частотные характеристики согласно выбранному критерию. По этой причине важной стороной параметрического синтеза является выбор критерия, по которому определяются свойства широкополосных частотно-избирательных цепей. В [6] представлен критерий по Тейлору. Для него характерно следующее: требуемая частотная характеристика  $\xi(\omega)$  и искомая аппроксимирующая функция  $K(\omega, b_i)$  с числом варьируемых параметров  $n$  допускают разложение в ряд Тейлора в некоторой точке  $\omega = \omega_0$  на интервале аппроксимации  $E$ . Также требуется, чтобы в этой точке совпадали значения максимального количества членов младших порядков обоих рядов.

С учетом того, что  $n$  – число варьируемых параметров функции  $K(\omega, b_i)$ , то в точке  $\omega = \omega_0$  должны выполняться условия:

$$K(\omega_0, b_i) = \xi(\omega_0); K'(\omega_0, b_i) = \xi'(\omega_0); K^{(n-1)}(\omega_0, b_i) = \xi^{(n-1)}(\omega_0). \quad (1)$$

Решением этой системы из  $n$  уравнений являются значения коэффициентов  $b_i$ , определяющих параметры аппроксимирующей функции.

По критерию Тейлора оптимальным является фильтр Баттерворта. Оптимальным по критерию Тейлора также является фильтр Бесселя. Характеристика группового времени запаздывания такого фильтра является максимально-плоской.

В [6] представлены два широко используемых критерия: чебышевский и среднестепенной. Чебышевский критерий близости определяется следующим выражением [6]:

$$\max_{\omega \in E} p(\omega) |\xi(\omega) - K(\omega, b_i)| \leq \min_{b_i} \delta = \delta, \quad (2)$$

где  $p(\omega)$  – весовая функция и по своему смыслу не может быть отрицательной;

$\delta$  – допустимое отклонение  $K(\omega, b_i)$  от  $\xi(\omega)$ .

Критерий (2) определяет достижение минимума максимальной ошибки аппроксимации на интервале аппроксимации  $E$  при выполнении процедуры вычисления коэффициентов  $b_i$ . На практике процедура вычислений выполняется на конечном множестве принадлежащих



интервалу аппроксимации  $E$  точек  $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_d\} \in E$ . При этом решается система уравнений [6]

$$\max_{\omega_i \in E} p(\omega_i) |\xi(\omega_i) - K(\omega_i, b_i)| \leq \min_{b_i} \delta, \quad i = 1, 2, \dots, d. \quad (3)$$

Среднестепенной критерий близости в качестве критерия, оценивающего близость функций  $\xi(\omega)$  и  $K(\omega, b_i)$ , записывается в следующем виде:

$$\int_E p(\omega) |\xi(\omega) - K(\omega, b_i)|^n d\omega \leq \min_{b_i} \delta, \quad (4)$$

где  $n$  – показатель степени.

Обычно приведенные критерии используются для приближения амплитудно-частотной либо фазочастотной характеристики синтезированной цепи к соответствующей характеристике идеального фильтра [5, 7]. Однако приближение к идеальному фильтру только по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) не всегда является достаточным при работе с широкополосными сигналами, которые требуют высокой линейности фазочастотной характеристики (ФЧХ) передающей широкополосной частотно-избирательной цепи.

Совместное приближение АЧХ и ФЧХ синтезируемой цепи к характеристикам идеального фильтра было предложено в [8]. Согласно методике, приведенной в данной работе, в качестве исходной выбирается аппроксимирующая функция коэффициента передачи минимально-фазового четырехполосника, все параметры которой используются для обеспечения требований к АЧХ. Затем выбирается аппроксимирующая функция неминимально-фазовой цепи, имеющей постоянный коэффициент передачи. Функция передачи всей цепи определяется произведением функций передачи. Такой метод синтеза получил название метода фазового корректирования [8]. Обычно он не приводит к оптимальному результату, поскольку все параметры передаточной функции используются неэффективно. Кроме того, для получения линейной ФЧХ в полосе пропускания степень передаточной функции увеличивается в  $n$ -е количество раз без какого-либо увеличения селективности [8].

В [9] предложен комплексный критерий оценки соответствия частотно-избирательной цепи идеальному фильтру в полосе пропускания. В [10] представлена методика решения задач параметрического синтеза частотно-избирательных цепей, разработанная на основе предложенного критерия. Для фильтра-прототипа, имеющего нормированную полосу пропускания и для которого в полосе пропускания  $\xi(\omega) = 1$ , данный критерий имеет вид

$$\left| 1 - \max_{b_i} \int_{-1}^1 \hat{K}(\omega, b_i) e^{j\omega t} d\omega \right| \leq \min_{b_i} \delta, \quad (5)$$

где  $\hat{K}(\omega, b_i)$  – искомая нормированная функция передачи цепи согласования.

Принцип оценки соответствия цепи с функцией передачи  $K(\omega, b_i)$  основан на зависимости уровня главного лепестка интегральной функции  $a(t) = \int_{-1}^1 \hat{K}(\omega, b_i) e^{j\omega t} d\omega$  от вида АЧХ и ФЧХ цепи в нормированной полосе пропускания.

Переход от низкочастотной к полосовой характеристике синтезируемой цепи реализуется частотным преобразованием, приведенным в [11]. Такой переход требует коррекции формы записи выбранного комплексного критерия (5). С учетом такого перехода для согласующей цепи в полосе частот, ограниченной нижней  $\omega_n$  и верхней  $\omega_b$  граничными частотами, выражение (5) можно представить в виде

$$\left| 1 - \max_{b_i} \left| \frac{1}{\omega_b - \omega_n} \int_{\omega_n}^{\omega_b} \hat{K}(\omega, b_i) e^{j\omega t} d\omega \right| \right| \leq \min_{b_i} \delta. \quad (6)$$

Для учета второй особенности применения комплексного критерия, а именно многополосного характера согласуемых цепей, введем дополнительный межполосный чебышевский критерий. Такой критерий обеспечивает качественную работу тракта, содержащего синтезируемую многополосную цепь, во всех заданных полосах пропускания. С учетом этого критерий для параметрического синтеза многополосных частотно-избирательных цепей, записанный на основе внутриволнового комплексного критерия соответствия идеальному фильтру в заданных полосах пропускания и межполосного чебышевского критерия, может быть представлен в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} & \left| 1 - \max \left| \frac{1}{\omega_{в1} - \omega_{н1}} \int_{\omega_{н1}}^{\omega_{в1}} \hat{K}(\omega, b_i) e^{j\omega t} d\omega \right| \right| \leq \min_{b_i} = \delta_1; \\ & \left| 1 - \max \left| \frac{1}{\omega_{в2} - \omega_{н2}} \int_{\omega_{н2}}^{\omega_{в2}} \hat{K}(\omega, b_i) e^{j\omega t} d\omega \right| \right| \leq \min_{b_i} = \delta_2; \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \\ & \left| 1 - \max \left| \frac{1}{\omega_{ви} - \omega_{ни}} \int_{\omega_{ни}}^{\omega_{ви}} \hat{K}(\omega, b_i) e^{j\omega t} d\omega \right| \right| \leq \min_{b_i} = \delta_i; \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$d_1 \delta_1 = d_2 \delta_2 = \dots = d_i \delta_i$$

где  $\omega_{ни}$ ,  $\omega_{ви}$  – границы  $i$ -й полосы согласования;

$\delta_i$  – допустимое отклонение главного лепестка интегральной функции в  $i$ -й полосе согласования;

$d_i$  – весовой коэффициент.

### Методика структурно-параметрического синтеза многополосных согласующих цепей

В настоящее время наиболее эффективным является структурно-параметрический синтез, основанный численной оптимизации согласующих цепей относительно заданного критерия близости. Для решения задачи структурно-параметрического синтеза многополосной согласующей цепи на основе критерия (7) зададимся эквивалентом сопротивления генератора и нагрузки. Также многополосную согласующую цепь представим в виде лестничного соединения, состоящего из  $n$  в общем случае различных реактивных сопротивлений (рис. 1).

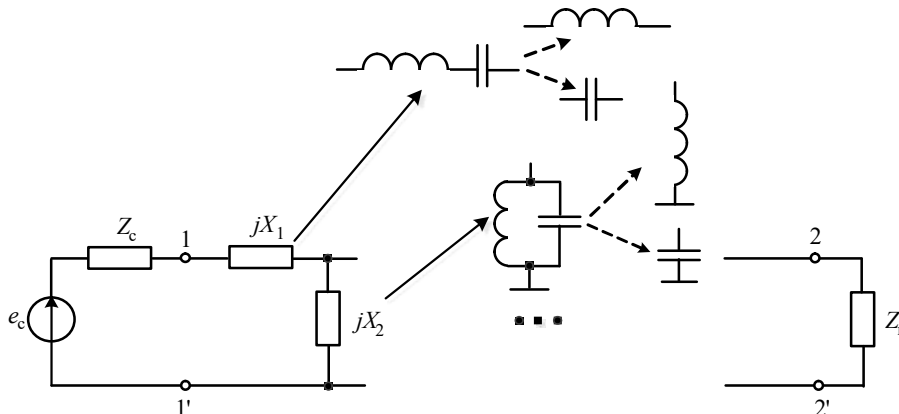


Рис. 1. Структурная схема четырехполюсника с резистивными сопротивлениями источника сигнала и нагрузки

Fig. 1. The block diagram of the quadrupole with resistive impedances of signal source and load

Каждый каскад согласующей цепи представляется в виде последовательной или параллельной ветви. Последовательная ветвь представляет собой последовательное соединение катушки индуктивности и конденсатора. В частном случае в процессе оптимизации в последовательной ветви один из элементов может оказаться отрицательным или равным нулю. В таком случае вместо данного элемента устанавливается короткое замыкание, т. е. он считается «Проводом». Параллельная ветвь представляет собой параллельное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Если в случае оптимизации параллельной ветви один из элементов контура также оказывается отрицательным или равным нулю, то данный элемент заменяется «Разрывом». Структурно-параметрический синтез осуществляется с применением программного продукта Mathcad 15 на основе встроенного метода оптимизации Левенберга –Марквардта.

На начальном этапе структурно-параметрического синтеза выбирается последовательная либо параллельная ветвь, обеспечивающая лучшее приближение к заданной функции по выбранному критерию. Дальнейший структурно-параметрический синтез многополосной цепи осуществляется наращиванием чередующихся последовательных и параллельных ветвей до обеспечения требуемого приближения функции передачи синтезируемой цепи к идеальному виду. Такой подход позволяет получить рациональные структуры синтезируемых многополосных цепей и уменьшить их время поиска.

Пример использования предложенной методики для решения задачи структурно-параметрического синтеза двухполосной согласующей цепи показан в [12]. В качестве нормированной нагрузки в указанном примере выбран эквивалент первого типа, состоящий из последовательного соединения сопротивления  $R_{\text{н}}=0,85$  Ом и емкости  $C_{\text{н}}=1,2$  Ф. Нормированное сопротивление источника сигнала выбрано  $R_{\text{с}}=1$  Ом. Синтезированная в примере многополосная цепь обеспечивает согласование выбранной нагрузки в диапазонах 2G и 3G (890–960 МГц и 1920–2170 МГц). Границы данных диапазонов нормированы относительно частоты 2170 МГц и составляют 0,41–0,44 и 0,88–1 рад/с. Также заданы приближения  $\delta_i$  (равные 0,1) при коэффициентах  $d_i$ , равных 1.

В качестве дополнительного приема требование по обеспечению межполосной частотной избирательности. Для его реализации в первой последовательной ветви синтезируемой цепи включим параллельный колебательный контур, вносящий ноль передачи на межполосной средней геометрической частоте, равной 0,66 рад/с.

На рис. 2 представлена схема двухполосной согласующей цепи, синтезированной по приведенной методике на основании критерия, представленного выражением (7). Частотные характеристики синтезированной двухполосной согласующей цепи представлены на рис. 3. В качестве сравнительных на рисунке дополнительно показаны характеристики цепи, синтезированной без учета требований по межполосному вносимому затуханию и приведенной в [12].

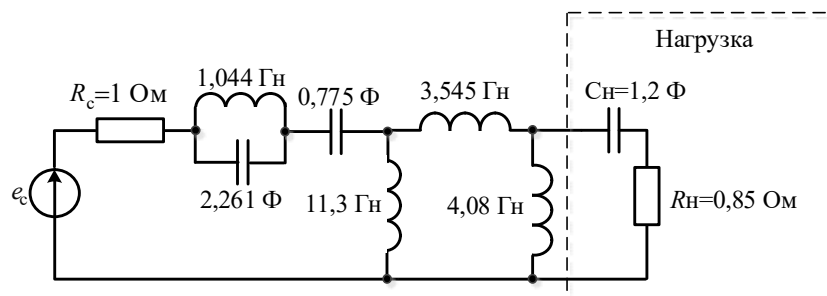
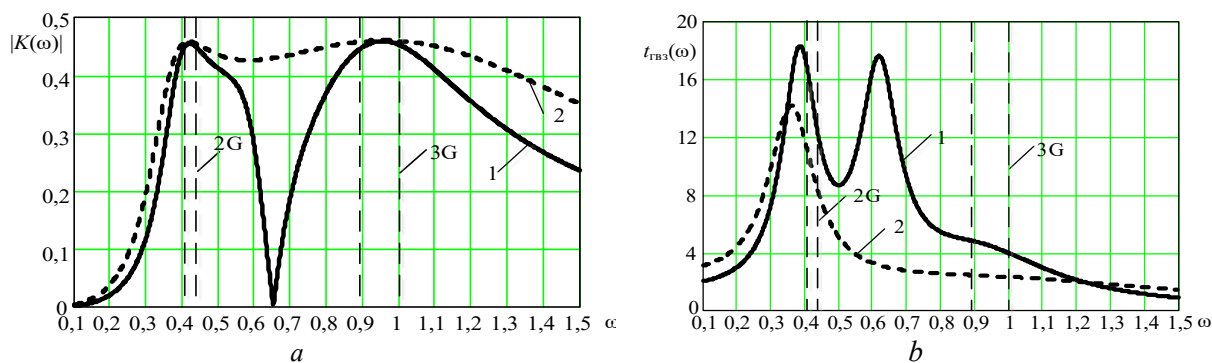


Рис. 2. Схема двухполосной согласующей цепи с нулем передачи на частоте 0,66 рад/с  
Fig. 2. The diagram of the two-band matching circuit with zero transmission at a frequency of 0.66 rad/s



**Рис. 3.** Частотные характеристики двухполосной согласующей цепи с учетом (1) и без учета (2) требуемого межполосного вносимого затухания: *a* – АЧХ; *b* – характеристика ГВЗ

**Fig. 3.** Frequency responses of the two-band matching circuit considering (1) and not considering (2) the required insertion attenuation: *a* – AFC; *b* – GTL performance

Синтезированная в данном примере цепь обеспечивает близкое приближение частотной характеристики к идеальной по выбранному критерию в обеих полосах пропускания. Наличие нуля передачи позволило синтезировать согласующую цепь с высоким вносимым затуханием в межполосной области. Однако введение такого нуля приводит к ухудшению равномерности характеристики группового времени запаздывания синтезируемой цепи. Синтезированная согласующая цепь на основе комплексного критерия соответствия идеальному фильтру обеспечивает требуемое совместное приближение частотных характеристик к идеальному виду в заданных диапазонах частот. Также применение структурно-параметрического синтеза многополосной согласующей цепи, реализуемого наращиванием чередующихся последовательных и параллельных ветвей, позволяет ограничить область поиска рациональных структур.

### Заключение

Предложенная методика структурно-параметрического синтеза многополосных согласующих цепей на основе внутриволнового комплексного критерия соответствия идеальному фильтру в заданных полосах пропускания и межполосного чебышевского критерия позволяет решать задачи многополосного согласования. Представленная методика обеспечивает синтез многополосных согласующих цепей на основе компромиссного приближения частотных характеристик синтезируемой цепи к характеристикам идеального фильтра. Дополнительно приведенная методика структурно-параметрического синтеза многополосных частотно-избирательных цепей позволяет учитывать межполосные требования по вносимому затуханию синтезируемых цепей. Применение структурно-параметрического синтеза многополосных согласующих цепей, реализуемых наращиванием чередующихся последовательных и параллельных ветвей с реактивным сопротивлением, позволяет определять их рациональные структуры.

### Список литературы

1. Богатырев А.Б., Горейнов С.А., Лямаев С.Ю. Аналитический подход к синтезу многополосных фильтров и его сравнение с другими подходами. *Проблемы передачи информации*. 2017;53:64-77.
2. Головков А.А., Кершис С.А. Частотные характеристики фазы и группового времени задержки многополосных фильтров. *Известия высших учебных заведений России, радиоэлектроника*. 2013;5:14-17.
3. Гиллемин Э.А. *Синтез пассивных цепей*. Пер. с англ. Виноградовой Н.И., Устинова В.В., Шалкевич Р.А. Москва: Связь; 1970.
4. Mohan V. Generalized synthesis and design of symmetrical multiplepassband filters. *Progress in Electromagnetics Research*. 2012;42:115-139.
5. Головков А.А., Кершис С.А. Метод анализа и синтеза многочастотных согласующих устройств на основе матриц рассеяния. *Вестник ВВШ МВД России*. 1998;2:45-47.
6. Ланнэ А.А. *Оптимальный синтез линейных электрических цепей*. Москва: Связь; 1969.

7. Титов А.А. Параметрический синтез межкаскадной корректирующей цепи широкополосного усилителя мощности на полевых транзисторах. *Радиотехника*. 2002;3:90-92.
8. Трифонов И.И. *Расчет электронных цепей с заданными частотными характеристиками*. Москва: Связь; 1969.
9. Шашок В.Н. *Частотно-избирательные цепи с нарастающе-волновой функцией передачи*. Минск: ВА РБ; 2018.
10. Коноплицкий А.С. Параметрический синтез широкополосных частотно-избирательных цепей на основе комплексного критерия соответствия идеальному фильтру в полосе пропускания. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2019;3:43-53.
11. Лэм Г. *Аналоговые и цифровые фильтры*. Пер. с англ.; под ред. Левина В.Л. Москва: Мир; 1982.
12. Коноплицкий А.С. Структурно-параметрический синтез многополосных согласующих цепей на основе комплексного критерия соответствия идеальному фильтру. *Вестник связи*. 2020;1:60-64.

### References

1. Bogatyryov A.B, Gorejnov S.A., Ljamaev S.Ju. [The analytical approach to synthesis of multiple bandpass filters and its comparison with other approaches]. *Problemy peredachi informacii = Information transfer problems*. 2017;53:64-77. (In Russ.)
2. Golovkov A.A, Kershis S.A. [Chastotnye harakteristika of a phase and group propagation delay of multibandpass filters]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij Rossii, radioelektronika = News of higher educational institutions of Russia, radio electronics*. 2013;5:14-17. (In Russ.)
3. Gillemine E.A. [Synthesis of passive chains]. Per. from English Vinogradovoj N.I., Ustinova V.V., Shalkevich R.A. Moscow: Svjaz; 1970. (In Russ.)
4. Mohan B. Generalized synthesis and design of symmetrical multiplepassband filters. *Progress in Electromagnetics Research*. 2012; 42:115-139.
5. Golovkov A.A., Kershis S.A. [Metod of the analysis and synthesis multifrequency devices on the basis of scattering matrixes]. *Vestnik VVSh MVD Rossii = Bulletin VVS the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 1998;2:45-47. (In Russ.)
6. Lanne A.A. [Optimum synthesis of the linear electric circuits]. Moscow: Svjaz; 1969. (In Russ.)
7. Titov A.A. [Parametric synthesis intercascade correcting chains of the wideband amplifier of power on field transistors]. *Radiotekhnika = Radio engineering*. 2002;3:90-92. (in Russ.)
8. Trifonov I.I. [Raschet of electronic chains with the given frequency responses]. Moscow: Svjaz; 1969. (in Russ.)
9. Shashok V.N. [Frequency selective chains from transmissionacruing undular function]. Minsk: MA RB; 2018. (in Russ.)
10. Konoplitsky A.S. [Parametric synthesis of broadband frequency selective chains on the basis of complex measure of conformity to the ideal filter in a transmission band]. *Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus = Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus*. 2019;3:43-53. (in Russ.)
11. Lem G. [Analog and numeral filters]. The lane with English; under the editorship of Levin V.L. Moscow: the World; 1982. (in Russ.)
12. Konoplitsky A.S. [Structurally synthesis multistrip chains on the basis of complex measure of conformity to the ideal filter]. *Vesnik suvyazi = Vesnik suvyazi*. 2020;1:60-64. (in Russ.)

### Вклад авторов

Шашок В.Н. определил проблему согласования многополосных согласующих цепей, для их оценки предложил внутрисполостный комплексный критерий соответствия идеальному фильтру в заданных полосах пропускания и межполосного чебышевского критерия.

Коноплицкий А.С. разработал методику структурно-параметрического синтеза на основе предложенного комплексного критерия.

### Authors' contribution

Shashok V.N. has spotted the problem of matching multi-band matching circuits and proposed for their estimation the intracavity complex criterion of conformity to the ideal filter in the specified passbands and interband Chebyshev criterion.

Kanaplitski A.S. has developed the procedure of structurally parametric synthesis on the basis of the proposed complex criterion.

### **Сведения об авторах**

Коноплицкий А.С., адъюнкт кафедры автоматике, радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Шашок В.Н., к.т.н., доцент, профессор кафедры автоматике, радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

### **Адрес для корреспонденции**

220057, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр. Независимости, 220  
Военная академия Республики Беларусь  
тел. +375-44-594-00-48;  
e-mail: andrey\_konoplizkii@mail.ru  
Коноплицкий Андрей Степанович

### **Information about the authors**

Kanaplitski A.S., PG student of Automation, Radar and Transceiving Devices Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Shashok V.N., PhD, Associate Professor, Professor of Automation, Radar and Transceiving Devices Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

### **Address for correspondence**

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosty ave., 220  
Military Academy of the Republic of Belarus  
tel. +375-44-594-00-48;  
e-mail: yantsevich1052500@mail.ru  
Kanaplitski Andrei Stepanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-71-79>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.382

## СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ СЛОЕВ CrSi<sub>2</sub>, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

СОЛОВЬЁВ Я.А.<sup>1</sup>, ПИЛИПЕНКО В.А.<sup>1</sup>, ГАЙДУК П.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Методами резерфордского обратного рассеяния, рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии поперечных сечений исследовано формирование слоев дисилицида хрома на подложках монокристаллического кремния *n*-типа с ориентацией (111) при быстром термическом отжиге в режиме теплового баланса. Пленки хрома толщиной порядка 30 нм наносили магнетронным распылением хромовой мишени ионами аргона на кремниевые подложки при комнатной температуре. Быструю термообработку проводили в интервале температур от 200 до 550 °С в режиме теплового баланса путем облучения обратной стороны подложек некогерентным световым потоком кварцевых галогенных ламп в среде азота в течение 7 с. Установлено, что формирование гексагональной фазы дисилицида хрома с размером зерен 150–300 нм происходит пороговым образом при превышении температуры быстрой термообработки 400 °С. Одновременно происходят сильные изменения поверхностной морфологии пленок, возникает шероховатость поверхности и границы раздела силицид-кремний. При этом волнообразная морфология поверхности пленки практически повторяет морфологию границы раздела силицида с кремнием (то есть является точной репликой границы раздела). Предложен и обсуждается механизм формирования шероховатости структуры границы раздела дисилицида хрома с кремнием, основанный на учете эффекта Киркендала и деформационно-стимулированной диффузии вакансий. Результаты исследований структуры и морфологии слоев дисилицида хрома на кремнии хорошо согласуются с результатами электрофизических измерений барьера Шоттки. Полученные результаты могут быть использованы в микроэлектронике при формировании выпрямляющих контактов и металлизации межсоединений в интегральных схемах, а также с целью термоэлектрических и оптоэлектронных применений.

**Ключевые слова:** быстрая термообработка, дисилицид хрома, структурно-фазовые превращения морфология поверхности.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Исследования проводились в рамках проектов ГПНИ (№ ГР 20190644, № ГР 20191100). Авторы признательны Прокопьеву С.Л., Мильчанину О.В., Пилько В.В. и Злоцкому С.В. за помощь при проведении эксперимента.

**Для цитирования.** Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А., Гайдук П.И. Структура и морфология слоев CrSi<sub>2</sub>, сформированных при быстрой термообработке. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 71-79.

## STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF CrSi<sub>2</sub> LAYERS FORMED BY RAPID THERMAL TREATMENT

JAROSLAV A. SOLOVJOV<sup>1</sup>, VLADIMIR A. PILIPENKO<sup>1</sup>, PETER I. GAIDUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup> Belorussian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The formation of chromium disilicide layers on n-type single crystal silicon substrates (111) during rapid thermal annealing in heat balance mode by the methods of Rutherford backscattering, X-ray diffraction and transmission electron microscopy of cross sections was investigated. Chromium films of about 30 nm thickness were deposited by magnetron sputtering of a chromium target with argon ions onto silicon substrates at room temperature. The rapid thermal treatment was carried out in a temperature range of 200 to 550 °C in a heat balance mode by irradiating the substrates backside with a non-coherent light flux of quartz halogen lamps in a nitrogen ambient for 7 s. It was established that hexagonal phase of chromium disilicide formation with grain size of 150–300 nm occurs in a threshold manner when the temperature of rapid thermal treatment exceeds 400 °C. At the same time, there are strong changes in the films surface morphology and surface roughness, and a silicide-silicon interface occur. In this case the wavy film surface morphology practically repeats silicide-silicon interface morphology (the surface exactly replicates the interface). The mechanism of CrSi<sub>2</sub>/Si interface structure roughness formation based on consideration of Kirkendall effect and deformation-stimulated diffusion of vacancies is proposed and discussed. The research results of the structure and morphology of CrSi<sub>2</sub> layers on silicon are well-correlated with the results of the Schottky barrier electrophysical measurements. The results obtained can be used in microelectronics for forming rectifying contacts and interconnects metallization for integrated circuits, as well as for thermoelectric and optoelectronic applications.

**Keywords:** rapid thermal treatment, chromium disilicide, structure and phase transformations, surface morphology.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** Studies carried out within the framework of SARP projects (SR № 20190644, SR № 20191100). Authors are grateful to Prokopyev S.L., Milchanin O.V., Pilko V.V., Zlotsky S.V. for assistance in performing the experiment.

**For citation.** Solovjov J.A., Pilipenko V.A., Gaiduk P.I. Structure and morphology of CrSi<sub>2</sub> layers formed by rapid thermal treatment. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 71-79.

### Введение

Силициды переходных металлов представляют особый интерес для научных исследований и промышленного применения из-за их многообещающих электрических и механических свойств, а также высокой термической и химической стабильности. Благодаря низкому удельному сопротивлению они привлекательны для применения в микроэлектронике в качестве омических контактов, барьеров Шоттки и металлизации межсоединений в интегральных схемах [1, 2]. Весьма перспективными для термоэлектрических и оптоэлектронных применений являются полупроводниковые силициды. Среди них нужно особо выделить силициды тугоплавких металлов, и в частности CrSi<sub>2</sub>. Дисилицид хрома является вырожденным полупроводником *p*-типа проводимости с шириной запрещенной зоны 0,35 эВ и температурно-стабильными характеристиками [1, 3, 4]. Благодаря высокой термоэлектрической мощности дисилицида хрома, особый интерес представляют гетероструктуры CrSi<sub>2</sub>/Si [5, 6]. При этом, как правило, предпочтение вызывают гетероструктуры эпитаксиального качества, выращенные на поверхности кремния ориентации (111), поскольку



гексагональная грань (001)-CrSi<sub>2</sub> имеет хорошее совпадение решетки (несоответствие примерно 0,13 %) с тригональной гранью (111)-Si [7]. Удельное сопротивление и термоэлектрическая мощность CrSi<sub>2</sub> демонстрируют сильную ориентационную зависимость [4], поэтому исследование морфологии тонких пленок CrSi<sub>2</sub>, выращенных на Si, представляется весьма важным как с научной, так и с практической точки зрения. Особенно это касается барьерных структур (барьеров Шоттки), характеристики которых могут сильно зависеть от шероховатости границы раздела CrSi<sub>2</sub>/Si, а также от наличия протяженных дефектов структуры (дислокаций, микродвойников, дефектов упаковки). Как показывает анализ литературных данных, при формировании гетероструктур CrSi<sub>2</sub>/Si возможно возникновение островков и несплошностей силицидного слоя, появление кристаллитов различных ориентаций, генерация дислокационных сеток несоответствия и двойников, возникновение межфазных доменов [7, 8]. Настоящая работа посвящена установлению особенностей изменения структуры и морфологии слоев CrSi<sub>2</sub>, получаемых на подложках монокристаллического кремния *n*-типа (111) при быстром термическом отжиге.

### Методика проведения эксперимента

Для исследований структуры и морфологии пленок Cr использовали пластины монокристаллического кремния (ПМК) марки КДБ 10 (111) диаметром 100 мм со сформированным на рабочей поверхности эпитаксиальным слоем, легированным фосфором кремния толщиной 5,3–5,8 мкм с удельным сопротивлением 0,58–0,63 Ом×см. Пленки Cr толщиной порядка 30 нм наносили на установке SNT «Sigma» с безмасляной откачкой магнетронным распылением хромовой мишени чистотой 99,5 % в среде аргона чистотой 99,993 % при давлении 0,5 Па. Диффузионный синтез силицида проводили в камере быстрой термической обработки (БТО) импульсами света секундной длительности в режиме теплового баланса (за время термообработки тепловой фронт достигает необлучаемой стороны образца и обеспечивается выравнивание температурного профиля по толщине подложки) на установке Jipelec JetFirst 100. Перед нагревом камера двукратно вакуумировалась с промежуточным и финальным напуском азота чистотой 99,995 %. БТО проводили облучением подложек с обратной стороны некогерентным световым потоком кварцевых галогенных ламп накаливания в течение 7 с при температуре от 200 до 550 °С. Контроль температуры рабочей стороны подложки осуществляли термопарой с точностью ±0,5 °С.

Структуру и фазовый состав исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с помощью электронного микроскопа Hitachi H-800 при ускоряющем напряжении 200 кВ с применением гониометрического устройства. Особенности структурно-фазовых состояний многослойных структур исследовали стандартными методами получения и анализа дифракционного контраста в сочетании с данными микродифракции. Для ПЭМ-исследований образцы препарировались в виде поперечных (Х-ПЭМ) сечений. Изготовление образцов для Х-ПЭМ проводилось в последовательности, включающей склейку пакетов образцов, механическую шлифовку и финальное двустороннее полирующее травление ионами Ag<sup>+</sup> с энергией 4 кэВ, ионным током 0,05 мА при угле падения пучка на поверхность 5°.

Химические профили атомов (состав) и толщину слоев в структурах Cr/Si и CrSi<sub>2</sub>/Si измеряли с помощью метода резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов He<sup>+</sup> с энергией 1,2 МэВ. Образцы фиксировались на кассете-держателе, укрепленной на 2-осевом гониометре, позволяющем ориентировать образцы по отношению к падающему пучку с точностью лучше 0,02°. Регистрация частиц, рассеянных под углом 170°, осуществлялась кремниевым поверхностно-барьерным детектором. Диаметр анализирующего пучка составлял 0,7–1,0 мм, ток пучка – 5–20 нА, общая доза ионов при снятии одного спектра – 5–100 мкКл. Разрешающая способность всего регистрирующего тракта составляла 11–14 кэВ. Исследования РОР проводили с использованием ядерно-физического комплекса на основе электростатического ускорителя ионов AN-2500 фирмы High Voltage. При преобразовании шкалы энергий в шкалу глубин, для полной обработки экспериментальных спектров РОР, а также для сравнения с теоретически моделированными спектрами использовался пакет расчетных программ HEAD6.

Исследования фазового состава структур  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  проводили на дифрактометре ULTIMA IV фирмы Rigaku с использованием геометрии параллельного пучка методом рентгенофазового анализа в медном ( $\text{CuK}\alpha$ ) излучении с длиной волны 0,154179 нм. Съемка образцов велась как в геометрии Брэгга – Брентано, так и при малых углах падения рентгеновского пучка. Для исследования фазового состава покрытий образец размещался на столике приставки для тонких пленок. Предварительно производилась автоматическая настройка высоты образца. Съемка образцов проводилась в диапазоне углов  $2\theta=10\text{--}120^\circ$ , с шагом  $0,05^\circ$  и скоростью движения детектора  $2^\circ/\text{мин}$  в геометрии Брэгга – Брентано. Определение фазового состава проводилось с помощью программного обеспечения PDXL-2 (фирмы Rigaku).

### Результаты и их обсуждение

Как следует из данных POP (рис. 1), толщина пленки хрома после осаждения составляет около 27 нм и остается неизменной после БТО вплоть до температуры  $350^\circ\text{C}$ . Однако увеличение температуры БТО до  $400^\circ\text{C}$  и выше приводит к существенному уширению пика ионов, обратно-рассеянных на атомах хрома (область каналов 240–280), и появлению ступеньки в области каналов 180–210 (рассеяние на атомах кремния). Такая трансформация спектров POP свидетельствует о формировании слоя с композиционным составом  $\text{CrSi}_2$ . Смещение переднего фронта кремниевого пика от 195 к 205 каналу означает, что дисилицид хрома выходит почти на поверхность, за исключением тонкого оксидного слоя, о чем свидетельствует небольшой пик в области каналов 115–130 (рассеяние ионов  $\text{He}^+$  на атомах кислорода). Таким образом, БТО при температуре выше  $400^\circ\text{C}$  приводит к трансформации исходной пленки Cr в фазу состава  $\text{CrSi}_2$ , при этом имеется незначительное окисление Cr на поверхности.

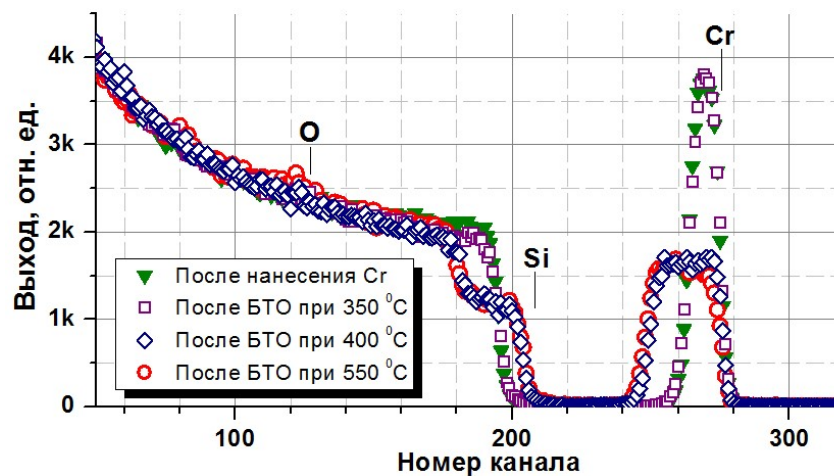
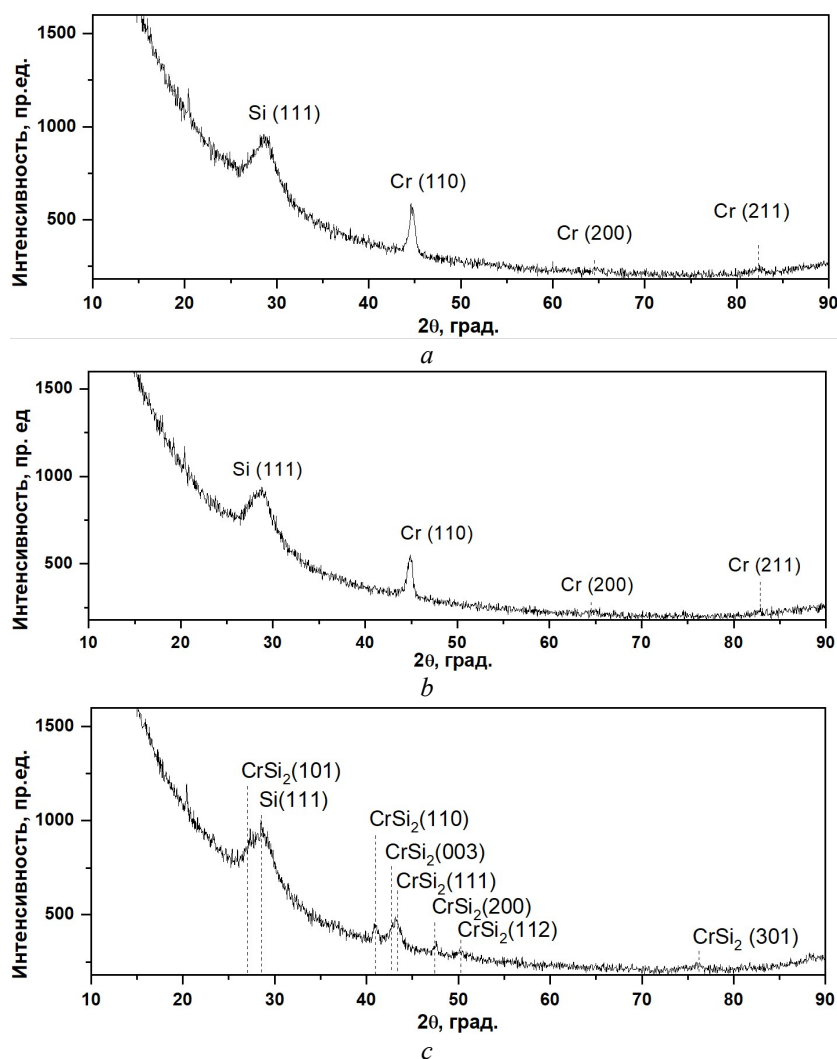


Рис. 1. Спектры POP от образцов Cr/Si после осаждения Cr и БТО  
Fig. 1. RBS spectra from Cr/Si samples after Cr deposition and RTP

Типичные рентгенограммы образцов кремния с исходной пленкой Cr, а также после БТО при температурах  $300$  и  $400^\circ\text{C}$  приведены на рис. 2, а, с и в табл. 1. Установлено, что исходный образец подложки кремния после нанесения пленки хрома представляет собой фазу Cr с кубической решеткой и параметром решетки, равным  $0,2872$  нм (табл. 1, рис. 2, а). Быстрая термическая обработка при температурах  $300$  и  $350^\circ\text{C}$  не приводит к изменению фазового состава образца подложки кремния с пленкой хрома. Вместе с тем происходит незначительное уменьшение параметра решетки Cr с  $0,2872$  до  $0,2854$  нм, что может быть связано с термическим уплотнением пленки, которое обусловлено отжигом точечных дефектов внутри зерен поликристаллического Cr и соответствующей реконструкцией межзеренных границ. Вместе с тем не обнаружено признаков появления пиков рентгеновской дифракции от силицидов хрома ни в исходных слоях Cr, ни в одном из подпороговых ( $T < 400^\circ\text{C}$ ) режимов БТО. Выполнение БТО при послепороговой температуре ( $T > 400^\circ\text{C}$ ) приводит к полной

трансформации пленки Cr в однофазную пленку CrSi<sub>2</sub>. (табл. 1.) пространственной группы P6<sub>3</sub>22 с гексагональной структурой C40 с постоянными решетки  $a = 4,428$  и  $c = 6,369$  Å [1, 3].



**Рис. 2.** Рентгенограммы структуры Cr/Si после осаждения Cr и БТО: *a* – после осаждения Cr; *b* – после БТО при 300 °С; *c* – после БТО при 400 °С  
**Fig. 2.** X-rays diffraction spectra of Cr/Si structure after Cr deposition and RTP: *a* – after Cr deposition; *b* – after RTP at 300 °C; *c* – after RTP at 400 °C

**Таблица 1.** Фазовый состав образцов с пленкой Cr после осаждения и БТО  
**Table 1.** Phase composition of samples with Cr film after deposition and RTP

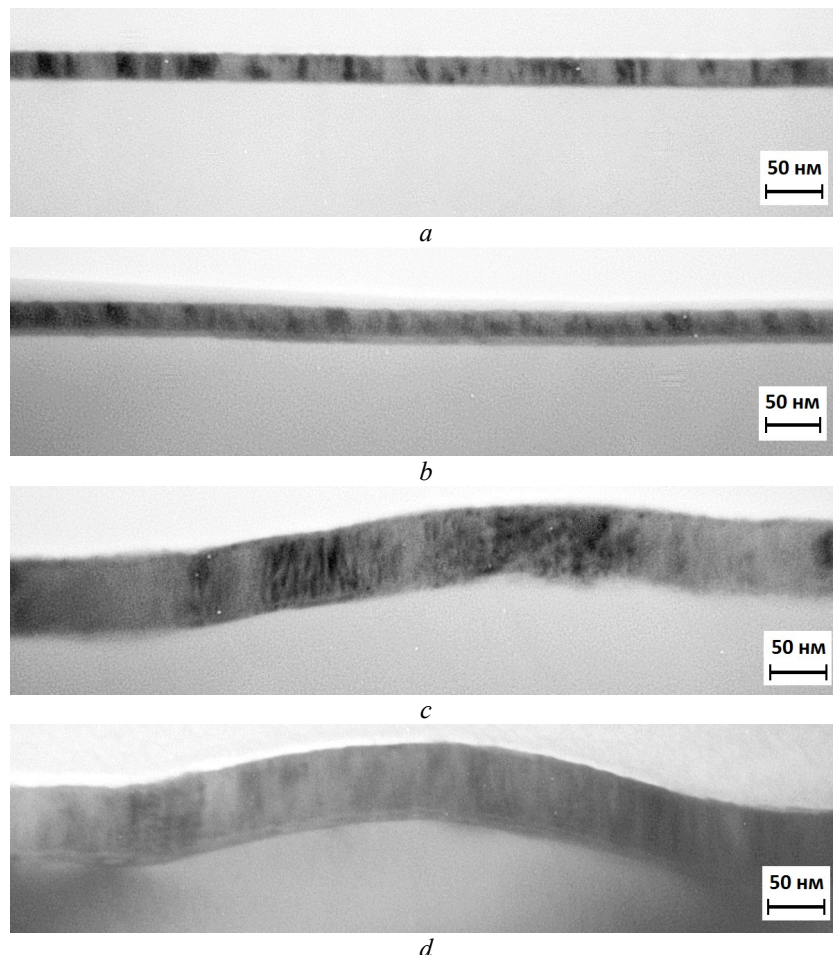
Температура БТО, °С RTP temperature, °C	Фазовый состав Phase composition	Параметр решетки, нм Lattice parameter, nm
Без термообработки	Cr	0,2872
300	Cr	0,2869
350	Cr	0,2854
400	CrSi <sub>2</sub>	$a = 0,4405$
550	CrSi <sub>2</sub>	$c = 0,6279$

Результаты рентгеноструктурных исследований хорошо коррелируют и дополняются данными просвечивающей электронной дифракции. В частности, картины микродифракции (здесь не показаны) обнаруживают локальные усиления интенсивности на дифракционных кольцах, что говорит о текстурировании зерен CrSi<sub>2</sub> подложкой кремния, что, в свою очередь, связано с эпитаксиальным упорядочиванием отдельных зерен. Из анализа картин микродифракции установлено, что наряду с зернами свободной ориентации в слоях силицида хрома имеет место формирование кристаллитов ориентации А: (CrSi<sub>2</sub>(001) <210> || Si (111) <110>)

и ориентации В:  $(\text{CrSi}_2(001)\langle 110 \rangle \parallel \text{Si}(111)\langle 110 \rangle)$ , что хорошо коррелирует с данными других авторов [1, 8].

Х-ПЭМ-анализ показал, что исходные пленки Cr (рис. 3, *a*) толщиной около 30 нм имеют поликристаллическую структуру с размером зерен 10–15 нм. БТО при температурах вплоть до 350 °С (рис. 3, *b*) не приводит к видимым изменениям толщины пленки и размера зерен. Пленки Cr остаются однородными по толщине и плоскими, без признаков заметной шероховатости как на поверхности, так и на границе раздела Cr/Si. Увеличение температуры БТО до 400 °С вызывает существенные изменения микроструктуры и морфологии пленок (рис. 3, *c*), при этом формируется слой  $\text{CrSi}_2$  толщиной около 70 нм, размеры зерен увеличиваются до 200–500 нм. Как следствие роста зерен можно было бы ожидать и изменения поверхностной морфологии пленок за счет развития наношероховатости границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$ , обусловленной различиями скоростей роста различных зерен, а также вызреванием зерен по механизму Оствальда [9]. Это обычно приводит к увеличению быстрорастущих зерен и их проникновению глубже в подложку за счет соседних медленно растущих зерен. В таких случаях толщина пленки неодинакова вдоль поверхности, а морфологии поверхности и границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  не являются репликами [9, 10].

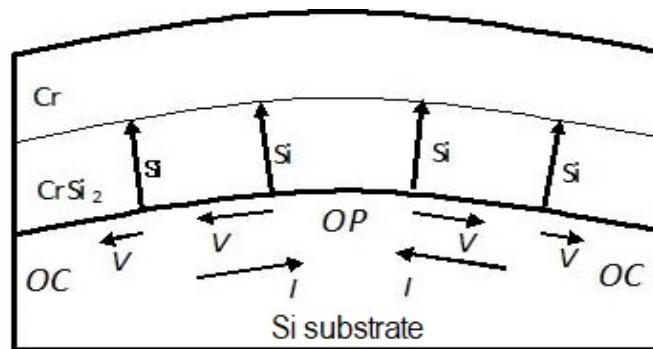
В рассматриваемом случае возникает иная ситуация (рис. 3 *c, d*): толщина слоя силицида, сформированного БТО при температуре 400–550 °С, оказывается одинаковой вдоль поверхности всей пластины, а волнообразная морфология поверхности практически повторяет морфологию границы раздела силицид-кремний (т. е. является точной репликой границы раздела).



**Рис. 3.** Светлопольные ПЭМ микрофотографии структур Cr/Si: *a* – после осаждения; *b* – после БТО при 350 °С; *c* – после БТО при 400 °С; *d* – после БТО при 450 °С

**Fig. 3.** Light-field TEM pictures of Cr/Si structures: *a* – after deposition; *b* – after RTP at 350 °С; *c* – after RTP at 400 °С; *d* – after RTP at 450 °С

Предполагается следующая модель для объяснения данного эффекта (рис. 4). Известно, что при формировании  $\text{CrSi}_2$  основным диффузионным компонентом является кремний [1]. То есть диффузия атомов Si через растущий слой  $\text{CrSi}_2$  на несколько порядков величины превышает диффузию атомов Cr. Поэтому Si является основным диффузионным компонентом. В соответствии с эффектом Киркендала на стороне кремния происходит генерация неравновесных вакансий. Уходя из подложки в сторону поверхности, атомы Si производят вакансии, которые, в случае кремния, не могут быть утилизированы, поскольку протяженные дефекты структуры имеют междоузельную природу [11]. Растущий слой  $\text{CrSi}_2$  между подложкой и поверхностью слоя Cr приводит к появлению упругих деформационных полей, которые распространяются, в том числе, и в подложку кремния. Так как размер подложки вдоль поверхности можно считать бесконечным по сравнению с межатомным расстоянием, то частичная релаксация упругих деформаций приводит к периодическому (волнообразному) распределению областей сжатия и растяжения вдоль границы раздела силицид-кремний  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$ . Как и в случае гетероструктур Si/SiGe [12, 13], области сжатия являются притягательными для вакансий, поскольку они способствуют частичной релаксации упругих напряжений. Соответственно, это является движущей силой и вызывает диффузионное перераспределение вакансий вдоль границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  к областям сжатия. Приход одной вакансии к границе раздела в области сжатия означает удаление одного узельного атома кремния и, следовательно, приводит к перемещению границы раздела на одну атомную позицию внутрь кристалла. Приток большого количества вакансий приводит к перемещению границы раздела на значительное расстояние. В результате формируется волнообразная граница раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  с практически постоянной толщиной слоя  $\text{CrSi}_2$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Образование макро-шероховатой границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  при БТО:

$\text{Si}$ ,  $V$ ,  $I$  – направления диффузии атомов кремния, вакансий и собственных междоузельных атомов кремния соответственно; OC – область сжатия, OP – область растяжения

**Fig. 4.** Creation of macro-rough  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  interface during RTP:  $\text{Si}$ ,  $V$ ,  $I$  – diffusion directions of silicon atoms, vacancies and own interstitial silicon atoms respectively; OC – the compression area; OP – the stretching area

Необходимо отметить, что морфология границы раздела силицид-кремний может оказывать существенное влияние на протекание электрического тока, а значит, и на характеристики соответствующих приборов (диодов Шоттки, ИК-детекторов и др.). Острые выступы, неоднородности состава, дислокации, дефекты упаковки на границе раздела силицид-кремний приводят к концентрации электрического поля и вызывают рост обратных токов. Поэтому плавная волнообразная граница раздела выгодно отличается от нанощероховатой, получаемой при равновесных, более высокотемпературных режимах [9, 10]. Исследования вольт-амперных характеристик барьеров Шоттки, проведенные в работе [14], подтверждают данный вывод. Так, рост высоты барьера при температурах БТО от 400 до 550 °С до величины порядка 0,615 В и улучшение коэффициента неидеальности до величины порядка 1,1 свидетельствует как о формировании фазы  $\text{CrSi}_2$ , так и об улучшении состояния границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  и снижении на ней плотности дефектов, что возможно только при наличии гладкой границы раздела.

## Заклучение

Таким образом, в работе исследованы особенности формирования слоев дисилицида хрома на пластинах (111)-Si при быстром термическом отжиге в режиме теплового баланса. С помощью методов РОР и рентгеновской дифракции установлено, что формирование гексагональной фазы дисилицида хрома с размером зерен 150–300 нм происходит пороговым образом при превышении температуры 400 °С. Одновременно имеют место сильные изменения поверхностной морфологии пленок: возникает шероховатость поверхности и границы раздела силицид-кремний, при этом волнообразная морфология поверхности практически повторяет морфологию границы раздела силицид-кремний (т. е. является точной репликой границы раздела). Предложен и обсуждается механизм формирования шероховатости структуры CrSi<sub>2</sub>/Si, основанный на учете эффекта Киркендала и деформационно-стимулированной диффузии вакансий. Полученные результаты могут быть использованы в микроэлектронике при формировании выпрямляющих контактов и металлизации межсоединений в интегральных схемах, а также с целью термоэлектрических и оптоэлектронных применений.

## Список литературы

1. Borisenko V.E. *Semiconducting Silicides*. Berlin: Springer; 2000.
2. Мьюрарка Ш.П. *Силициды для СБИС*. Москва: Мир; 1986.
3. Shinoda D., Asanabe S., Sasaki Y.J. Semiconductor properties of chromium disilicide. *J. Phys. Soc. of Japan*. 1964;19(3):269-272. DOI: 10.1143/JPSJ.19.269.
4. Nishida I. The crystal growth and thermoelectric properties of chromium disilicide. *J. Mat. Sci.* 1972;7:1119-1124. DOI: 10.1007/BF00550193.
5. Karuppaiah S., Beaudhuin M., Viennois R. Investigation on the thermoelectric properties of nanostructured Cr<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>Si<sub>2</sub>. *Journal of Solid State Chemistry*. 2013;199:90-95. DOI: 10.1016/j.jssc.2012.12.004.
6. Khalil M., Beaudhuin M., Villeroy B., Ravot D., Viennois R. A modeling approach for new CrSi<sub>2</sub> based alloys: Application to metastable Cr<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>Si<sub>2</sub> as a potential thermoelectric material. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016; 662: 150-156. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.12.048.
7. Long R.G., Becker J.P., Mahan J.E., Vantomme A., Nicolet M.-A. Heteroepitaxial relationships for CrSi<sub>2</sub> thin films on Si(111). *J. App. Phys.* 1995;77:3088-3094. DOI: 10.1063/1.359539.
8. Rocher A., Oustry A., David M.J., Caumont M. CrSi<sub>2</sub>/Si(111): Growth of monotype domains by solid phase epitaxy on a vicinal surface. *J. Vac. Sci Technol. A*. 1994;12:3018-3022. DOI: 10.1116/1.578930.
9. Martinez A., Esteve D., Guivarch A., Auvray P., Henoc P., Pelous G. *Solid-State Electronics*. 1980;23:55-63. DOI: 10.1016/0038-1101(80)90168-9.
10. Filonenko O., Falke M., Hortenbach H., Henning A., Beddies G., Hinneberg H.-J. *Appl. Surf. Sci.* 2004;227:341-348. DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.011.
11. Jones K.S., Prussin S., Weber E.R. A systematic analysis of defects in ion-implanted silicon. *Appl. Phys. A*. 1988;45:1-34. DOI: 10.1007/BF00618760.
12. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N., Steinman E.A. Nanovoids in MBE grown SiGe alloys in-situ implanted with Ge<sup>+</sup> ions. *Physical Review B*. 2003;67:235310. DOI: 10.1103/PhysRevB.67.235310.
13. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N., Wendler E., Wesch W. Self assembling of nanovoids in 800 keV Ge implanted Si/SiGe multi-layered structure. *Physical Review B*. 2003; 67: 235311. DOI: 10.1103/PhysRevB.67.235311.
14. Соловьев Я.А., Пилипенко В.А. Влияние условий быстрой термической обработки на электрофизические свойства тонких пленок хрома на кремнии. *Доклады БГУИР*. 2019;7-8(126):157-164. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-157-164.

## References

1. Borisenko V.E., *Semiconducting Silicides*. Berlin: Springer; 2000.
2. M'jurarka Sh.P. [*Silitsidy dlja SBIS*]. Moscow: Mir; 1986. (In Russ.)
3. Shinoda D., Asanabe S., Sasaki Y.J. Semiconductor properties of chromium disilicide. *J. Phys. Soc. of Japan*. 1964;19(3):269-272. DOI: 10.1143/JPSJ.19.269.
4. Nishida I. The crystal growth and thermoelectric properties of chromium disilicide. *J. Mat. Sci.* 1972;7:1119-1124. DOI: 10.1007/BF00550193.
5. Karuppaiah S., Beaudhuin M., Viennois R. Investigation on the thermoelectric properties of nanostructured Cr<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>Si<sub>2</sub>. *Journal of Solid State Chemistry*. 2013;199:90-95. DOI: 10.1016/j.jssc.2012.12.004.

6. Khalil M., Beaudhuin M., Villeroy B., Ravot D., Viennois R. A modeling approach for new CrSi<sub>2</sub> based alloys: Application to metastable Cr<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>Si<sub>2</sub> as a potential thermoelectric material. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;662:150-156. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.12.048.
7. Long R.G., Becker J.P., Mahan J.E., Vantomme A., Nicolet M.-A. Heteroepitaxial relationships for CrSi<sub>2</sub> thin films on Si(111). *J. App. Phys.* 1995;77:3088-3094. DOI: 10.1063/1.359539.
8. Rocher A., Oustry A., David M.J., Caumont M. CrSi<sub>2</sub>/Si(111): Growth of monotype domains by solid phase epitaxy on a vicinal surface. *J. Vac. Sci Technol. A*. 1994;12:3018-3022. DOI: 10.1116/1.578930.
9. Martinez A., Esteve D., Guivarch A., Auvray P., Henoc P., Pelous G. *Solid-State Electronics*. 1980;23:55-63. DOI: 10.1016/0038-1101(80)90168-9.
10. Filonenko O., Falke M., Hortenbach H., Henning A., Beddies G., Hinneberg H.-J. *Appl. Surf. Sci.* 2004;227:341-348. DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.011.
11. Jones K.S., Prussin S., Weber E.R. A systematic analysis of defects in ion-implanted silicon. *Appl. Phys. A*. 1988;45:1-34. DOI: 10.1007/BF00618760.
12. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N., Steinman E.A. Nanovoids in MBE grown SiGe alloys in-situ implanted with Ge<sup>+</sup> ions. *Physical Review B*. 2003;67:235310. DOI: 10.1103/PhysRevB.67.235310.
13. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N., Wendler E., Wesch W. Self assembling of nanovoids in 800 keV Ge implanted Si/SiGe multi-layered structure. *Physical Review B*. 2003;67:235311. DOI: 10.1103/PhysRevB.67.235311.
14. Solovjov J.A., Pilipenko V.A. [Effect of rapid thermal treatment conditions on electrophysical properties of chromium thin films on silicon]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;7-8(126):157-164. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-157-164. (In Russ.)

### Вклад авторов

Соловьёв Я.А. изготовил экспериментальные образцы, выполнил анализ результатов.  
Пилипенко В.А. осуществил постановку задачи, выполнил электрофизические измерения.  
Гайдук П.И. выполнил анализ и интерпретацию результатов POP, ПЭМ и фазового состава, предложил механизм формирования шероховатости структуры CrSi<sub>2</sub>/Si.

### Authors' contribution

Solovjov J.A. made experimental samples, performed analysis and interpretation of the results.  
Pilipenko V.A. stated the problem and performed electrophysical measurements.  
Gaiduk P.I. performed analysis and interpretation of RBS, TEM and phase composition results, proposed the mechanism of CrSi<sub>2</sub>/Si interface structure roughness formation.

### Сведения об авторах

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корр. НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Гайдук П.И., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
Минск, ул. Корженевского, 16,  
Филиал «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» –  
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
тел. +375-172-122-121;  
e-mail: jsolovjov@integral.by  
Соловьёв Ярослав Александрович

### Information about the authors

Solovjov J.A., PhD, Associate Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Pilipenko V.A., D.Sci., Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Science Research of the State Centre “Belmicroanalysis” Affiliate RDC “Belmicrosystems” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Gaiduk P.I., D.Sci., Professor, Professor of Physical electronics and nanotechnologies Department of Belarusian State University.

### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Korzhenevskogo str., 16,  
“Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” –  
“INTEGRAL” holding managing company  
tel. +375-172-122-121;  
e-mail: jsolovjov@integral.by  
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 534.29

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

КОТУХОВ А.В., ГАВРИЛЮК В.С., МИНЧУК В.С., ДЕЖКУНОВ Н.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 24 апреля 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** В настоящее время сфера применений мощного ультразвука интенсивно расширяется, продолжается совершенствование оборудования и технологических процессов. При этом ключевым фактором воздействия ультразвуковых колебаний на процессы в жидкостях и жидкообразных средах является кавитация – явление образования, пульсации и захлопывания микропузырьков газа под действием переменного давления. Широкое внедрение перспективных ультразвуковых технологий в значительной мере сдерживается тем, что закономерности генерирования кавитации изучены недостаточно, а известные в литературе данные противоречивы и характеризуются низкой воспроизводимостью. В данной работе приводится описание инновационного метода исследования ультразвуковой кавитации. С целью повышения воспроизводимости результатов и достоверности выводов о корреляции различных кавитационных эффектов предложено регистрировать одновременно параметры, характеризующие эти эффекты. Разработана и апробирована установка, предназначенная для реализации данного метода. Установка обеспечивает возможность регистрации полного выходного сигнала гидрофона, интенсивности свечения, генерируемого в кавитационной области – звуколюминесценции, спектра кавитационного шума и отдельных его составляющих. Технические характеристики установки позволяют регулировать скорость развития кавитационной области путем варьирования длительности и периода следования импульсов ультразвука и проводить измерения в низкочастотных (НЧ), высокочастотных (ВЧ) и взаимодействующих ВЧ и НЧ ультразвуковых полях. В ходе испытаний установки получены результаты, представляющие значительный интерес с точки зрения уточнения представлений о механизме генерирования кавитационных эффектов. Установлено, что предварительная обработка жидкости в ультразвуковом поле с целью ее дегазации в течение 15–20 мин обеспечивает значительное повышение воспроизводимости измерений, особенно для жидкостей с высоким газосодержанием. На основании сопоставления результатов синхронной регистрации сигналов датчика кавитации и фотоумножителя показано, что кавитационная область после включения ультразвука проходит четыре стадии развития, различающиеся динамикой изменения интенсивности звуколюминесценции и составом регистрируемых при этом спектров кавитационного шума. Сделан вывод о возможности идентификации стадий развития кавитационной области по спектрам кавитационного шума.

**Ключевые слова:** ультразвук, кавитация, звуколюминесценция, кавитационный шум.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** В статье представлены результаты, полученные в ходе выполнения работ по проекту «Разработать и изготовить ультразвуковой кавитационный комплекс (УЗКК)» подпрограммы «Уникальное научное оборудование» ГНТП «Эталон и научные приборы».

**Для цитирования.** Котухов А.В., Гаврилюк В.С., Минчук В.С., Дежкунов Н.В. Комбинированный метод исследования акустической кавитации. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 80-88.



## COMBINED METHOD FOR ACOUSTIC CAVITATION RESEARCH

ALEKSEI V. KOTUKHOV, VITALIY S. GAVRILYUK, VIACHESLAV S. MINCHUK,  
NIKOLAI V. DEZHKUNOV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 24 April 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** At present, the field of applications of powerful ultrasound is expanding intensively, and the improvement of equipment and technological processes continues. With that, the key factor in the effect of ultrasonic vibrations on processes in liquids and liquid-like media is cavitation, i.e. the phenomenon of formation, pulsation and collapse of gas microbubbles under the influence of variable pressure. The widespread introduction of promising ultrasound technologies is largely constrained by the fact that the patterns of cavitation generation are not well understood, and the data known in the literature are contradictory and are characterized by low reproducibility. This paper describes an innovative method for studying ultrasonic cavitation. In order to increase the reproducibility of the results and the reliability of the conclusions about the correlation of various cavitation effects, it is proposed to register simultaneously the parameters characterizing these effects. An installation designed to implement this method has been developed and tested. The installation provides the ability to register the full output signal of the hydrophone, the intensity of the glow generated in the cavitation region - sound luminescence, the cavitation noise spectrum and its individual components. Technical characteristics of the installation allow you to adjust the rate of development of the cavitation region by varying the duration and period of the ultrasound pulses. It is possible to conduct experiments both in low-frequency (LF) and high-frequency (HF) fields as well as in interacting HF and LF ultrasonic fields. During the testing of the installation, the results were obtained that are of considerable interest from the point of view of refining the ideas about the mechanism for generating cavitation effects. It was found that preliminary treatment of the liquid in an ultrasonic field with the aim of its degassing for 15–20 min provides a significant increase in the reproducibility of measurements, especially for liquids with a high gas content. Based on a comparison of the time dependences of the signals of the cavitation sensor and the photomultiplier output, the characteristic stages of the development of the cavitation region are distinguished, which differ in the dynamics of the development of the cavitation region and in the composition of the cavitation noise spectra recorded.

**Keywords:** ultrasound, cavitation, sonoluminescence, cavitation noise.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The article presents the results obtained in the course of the work on the project “Design and manufacture of an ultrasonic cavitation complex (UZKK)” subprogram “Unique scientific equipment” of the state scientific-technical program “Standards and scientific instruments”.

**For citation.** Kotukhov A.V, Gavrilyuk V.S., Minchuk V.S., Dezhkunov N.V. Combined method for acoustic cavitation research. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 80-88.

### Введение

Ультразвук применяется для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях уже несколько десятилетий [1–3]. В настоящее время сфера применений мощного ультразвука интенсивно расширяется, продолжают совершенствоваться оборудование и разработка новых ультразвуковых технологий. Перспективные результаты получены при обработке суспензий наночастиц [4, 5], в пищевой промышленности [6], в звукохимии [7], медицине [8] и других областях. При этом показано, что ключевым фактором воздействия ультразвуковых колебаний на процессы в жидкостях и жидкообразных средах является кавитация – явление образования, пульсации и захлопывания микропузырьков под действием переменного давления [8]. При пульсациях и захлопывании пузырьков генерируются ударные волны, высокие температуры, давления и микроструи жидкости. Обычно выделяют два типа

кавитационных пузырьков [8, 9]: стабильно пульсирующие в течение времени, много большим периода  $T$  ультразвуковых колебаний (стационарные), и нестабильные, или нестационарные (transient), время жизни которых обычно не превышает  $T$ .

Широкое внедрение перспективных ультразвуковых технологий в значительной мере сдерживается тем, что закономерности генерирования кавитации изучены недостаточно, а известные в литературе данные часто противоречивы и характеризуются низкой воспроизводимостью.

В данной работе приводится описание инновационного метода исследования ультразвуковой кавитации. С целью повышения воспроизводимости результатов и достоверности выводов о корреляции различных кавитационных эффектов предложено регистрировать одновременно параметры, характеризующие эти эффекты.

### Методика проведения эксперимента

Схема установки приведена на рис. 1. Рабочая емкость 5 в виде цилиндра диаметром 100 мм и высотой 160 мм выполнена из нержавеющей стали. Высокочастотный (ВЧ) (720 кГц) фокусирующий излучатель 4 ультразвуковых колебаний диаметром 40 мм вмонтирован в дно емкости. В боковой поверхности емкости выполнено три окна на уровне фокального пятна нижнего фокусирующего излучателя. В двух окнах оппозитно друг другу установлены два одинаковых фокусирующих пьезокерамических преобразователя 6 и 7. Один из них 6 служит излучателем, а второй 7 – приемником акустического сигнала на частоте 1,5 МГц.

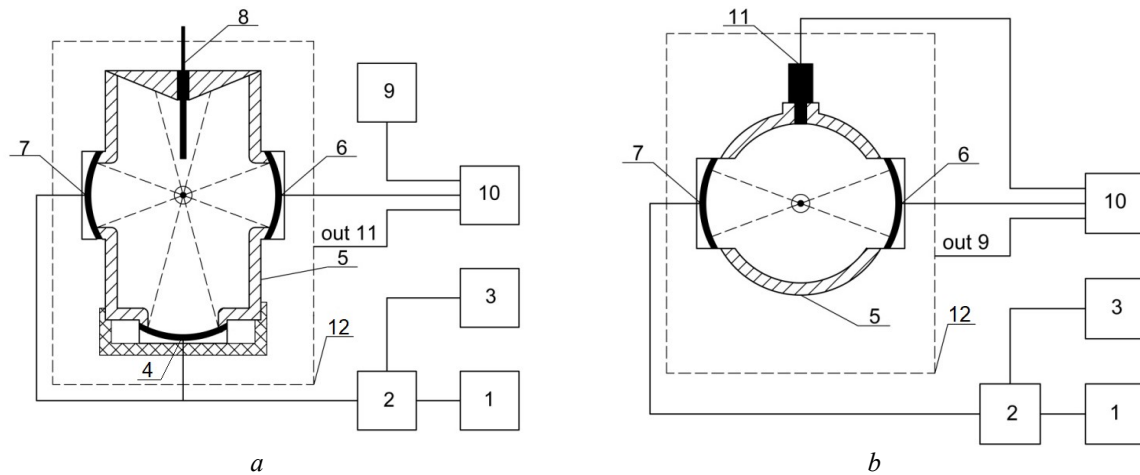
Система излучатель 6 – приемник 7 предназначена для оценки поглощения ультразвука в кавитационной области, генерируемой излучателем 4. Режим работы излучателя 6 выбирается таким, чтобы интенсивность ультразвуковых колебаний в поле этого излучателя была не менее чем в 10 раз ниже порога кавитации на частоте 1,5 МГц. Датчик кавитации 8 установлен через крышку емкости таким образом, что пьезоэлемент датчика, преобразующий акустический сигнал в электрический, находится на расстоянии 25 мм от фокального пятна нижнего фокусирующего излучателя 4. Пьезоэлемент выполнен в виде диска диаметром 2 мм и толщиной 0,25 мм.

Вместо второго ВЧ излучателя 6 может быть установлен низкочастотный (НЧ) (22 кГц) излучатель. В результате появляется возможность генерировать и исследовать кавитацию в одинаковых условиях в ВЧ и НЧ ультразвуковых полях и при взаимодействии ВЧ и НЧ полей.

Высокий уровень однородности ультразвукового поля и отсутствие стоячих волн обеспечиваются использованием конической гофрированной крышки. Такая конструкция уменьшает площадь поверхности раздела жидкость – газ и обеспечивает постоянство уровня жидкости в реакторе. В большинстве известных в литературе исследований уровень жидкости не контролировался или контролировался с недостаточной точностью.

Для регистрации звуколюминесценции (ЗЛ) используется фотоумножитель 11 Phillips XP1110 со световодом диаметром 20 мм, установленный на уровне фокального пятна излучателя. Сигнал с фотоумножителя подается на двухканальный осциллограф 10 Hewlett Packard 54601A. На этот же осциллограф подается сигнал с датчика кавитации. Для исследования спектров кавитационного шума к осциллографу параллельно подключается анализатор спектра. В рассматриваемом случае использовался анализатор Hewlett Packard E4411B.

Для питания излучателей используется генератор УЗГ-08-01 (БГУИР). Данный генератор управляется компьютером и оснащен системой автоматического поддержания резонансной частоты (АПЧ). Также в установку входит кавитометр ICA-4D (БГУИР, г. Минск) и блок АЦП (БГУИР, Минск). На АЦП одновременно может подаваться три сигнала: выходной сигнал кавитометра, выходной сигнал фотоумножителя и напряжение на излучателе. Данные с АЦП поступают на компьютер, где обрабатываются и визуализируются в реальном масштабе времени в виде временных зависимостей.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: *a* – вид сбоку; *b* – вид сверху

1 – генератор, 2 – генератор импульсов, 3 – смеситель, 4 – излучатель ультразвука, 5 – рабочая емкость, 6 – второй излучатель, 7 – приемный пьезоэлемент, 8 – датчик кавитации, 9 – предусилитель, 10 – запоминающий осциллограф, 11 – фотомножитель, 12 – светонепроницаемый короб

**Fig. 1.** Experimental setup: *a* – side view; *b* – top view

1 – generator, 2 – pulse generator, 3 – mixer, 4 – ultrasound transducer, 5 – working capacity, 6 – second transducer, 7 – receiving piezoelectric element, 8 – cavitation sensor, 9 – pre-amplifier, 10 – storage oscilloscope, 11 – photomultiplier, 12 – light box

В ходе испытаний данного оборудования установлено, что предварительная обработка жидкости в ультразвуковом поле с целью ее дегазации в течение 15–20 мин обеспечивает значительное повышение воспроизводимости измерений, особенно для жидкостей с высоким газосодержанием.

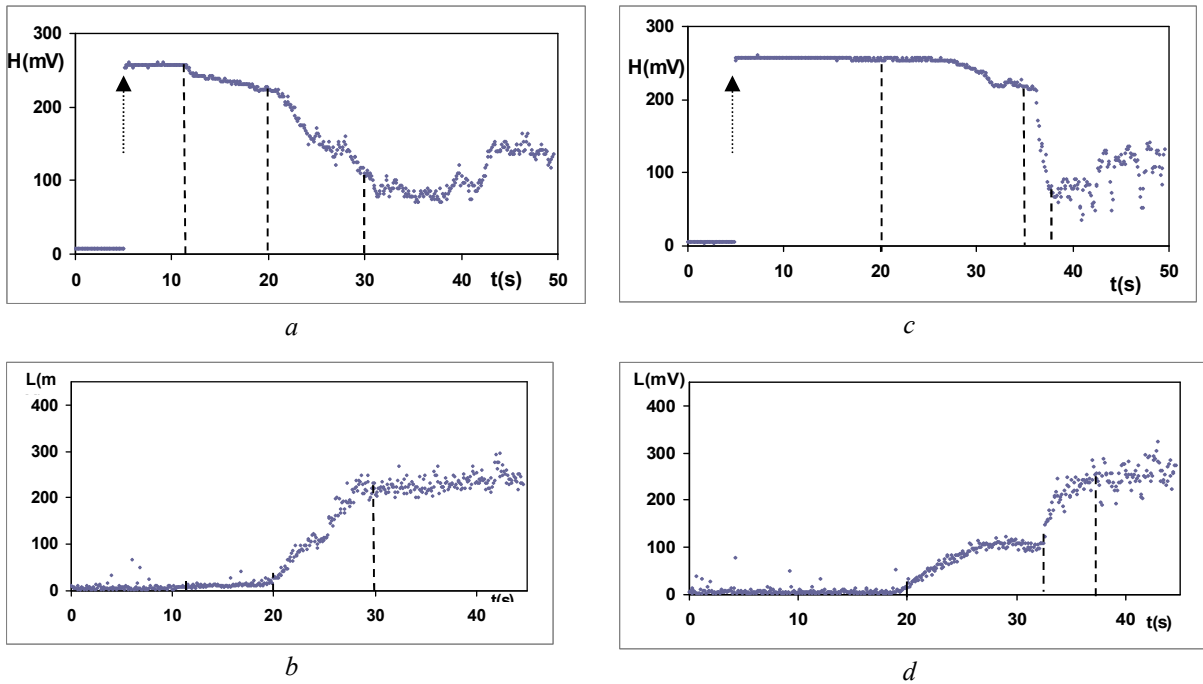
Ниже приведены результаты испытаний установки, демонстрирующие ее возможности.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены результаты одновременной регистрации выходного сигнала датчика кавитации  $H$  и выходного сигнала фотомножителя  $L$ . Напряжение на излучателе в ходе проведения эксперимента поддерживалось постоянным. Данные, представленные в левом столбце (рис. 2, *a, b*), получены при длительности импульсов ультразвука  $\tau = 5$  мс, в правом (рис. 2, *c, d*) – 1 мс. Остальные параметры одинаковы для обоих столбцов.

Ультразвуковое поле включалось на 5-й секунде после начала регистрации зависимостей. В момент включения ультразвука  $H$  увеличивается скачком, а значение  $L$  остается близким к нулевому. Последнее указывает на то, что инерционная кавитация в данном режиме возникает с некоторой задержкой по отношению к моменту включения ультразвука. На начальном этапе регистрации (первых пяти секунд после включения ультразвука на рис. 2, *a*) выходной сигнал датчика практически не меняется. Примерно на 11-й секунде (рис. 2, *a*) наблюдается снижение уровня сигнала, регистрируемого датчиком. Увеличение поглощения ультразвука, очевидно, вызвано появлением пузырьков в кавитационной области. Одновременно возникает ЗЛ (рис 2, *b*).

Задержка возникновения ЗЛ по отношению к моменту включения ультразвука связана, очевидно, с тем, что в жидкости отсутствуют пузырьки резонансного размера (примерно 3,5 мкм для частоты 720 кГц). Имеющиеся зародыши меньшего размера в результате пульсаций под действием ультразвука вырастают до резонансного размера за счет выпрямленной диффузии [9, 10] газа из жидкости в пузырек. На этой стадии пузырьки под действием переменного давления начинают пульсировать с большой амплитудой, а в фазе сжатия звуковой волны захлопываются и генерируют характерные кавитационные эффекты: ударные волны и ЗЛ, т. е. возникает нестационарная кавитация.



**Рис. 2.** Динамика развития кавитационной области в импульсном ультразвуковом поле:  $a, c$  – выходной сигнал датчика  $H$ ;  $b, d$  – выходной сигнал фотоумножителя  $L$ . Частота ультразвука  $f_0 = 720$  кГц, излучаемая мощность 1,7 Вт, период следования импульсов ультразвука 75 мс, длительность импульсов ультразвука  $\tau = 5$  мс ( $a, b$ ) и 1 мс ( $c, d$ ). Стрелкой вверх отмечен момент включения ультразвука, вертикальными штриховыми линиями отделены стадии развития кавитационной области

**Fig. 2.** The dynamics of the development of the cavitation region in a pulsed ultrasonic field:  $a, c$  – the output signals of the sensor  $H$ ;  $b, d$  – the output signals of the photomultiplier  $L$ . The frequency of ultrasound is  $f_0 = 720$  kHz, the radiated power is 1.7 W, the repetition period of ultrasound pulses is 75 ms, the duration of ultrasound pulses is  $\tau = 5$  ms ( $a, b$ ) and 1 ms ( $c, d$ ). The arrow marks the moment the ultrasound is turned on, the stages of development of the cavitation zone are separated by vertical dashed lines

На второй стадии, в промежутке времени примерно от 11-й до 20-й секунды (рис. 2,  $b$ ), интенсивность ЗЛ растет относительно медленно. Также медленно увеличивается и поглощение ультразвука, что следует из соответствующего уменьшения выходного сигнала датчика  $H$  (рис. 2,  $a$ ). На третьей стадии (от 20-й до 28-й секунды, рис. 2,  $b$ ) наблюдается существенное увеличение интенсивности ЗЛ, а наклон зависимости  $L(t)$  меняется скачком. Одновременно меняется также и характер зависимости  $H(t)$ , что вызвано быстрым увеличением поглощения ультразвука в кавитационной области. Из сопоставления двух зависимостей на рисунках 2,  $a, b$  можно сделать вывод, что увеличение активности кавитации связано с увеличением числа кавитационных пузырьков в фокальной области излучателя на первых двух стадиях развития кавитационной области.

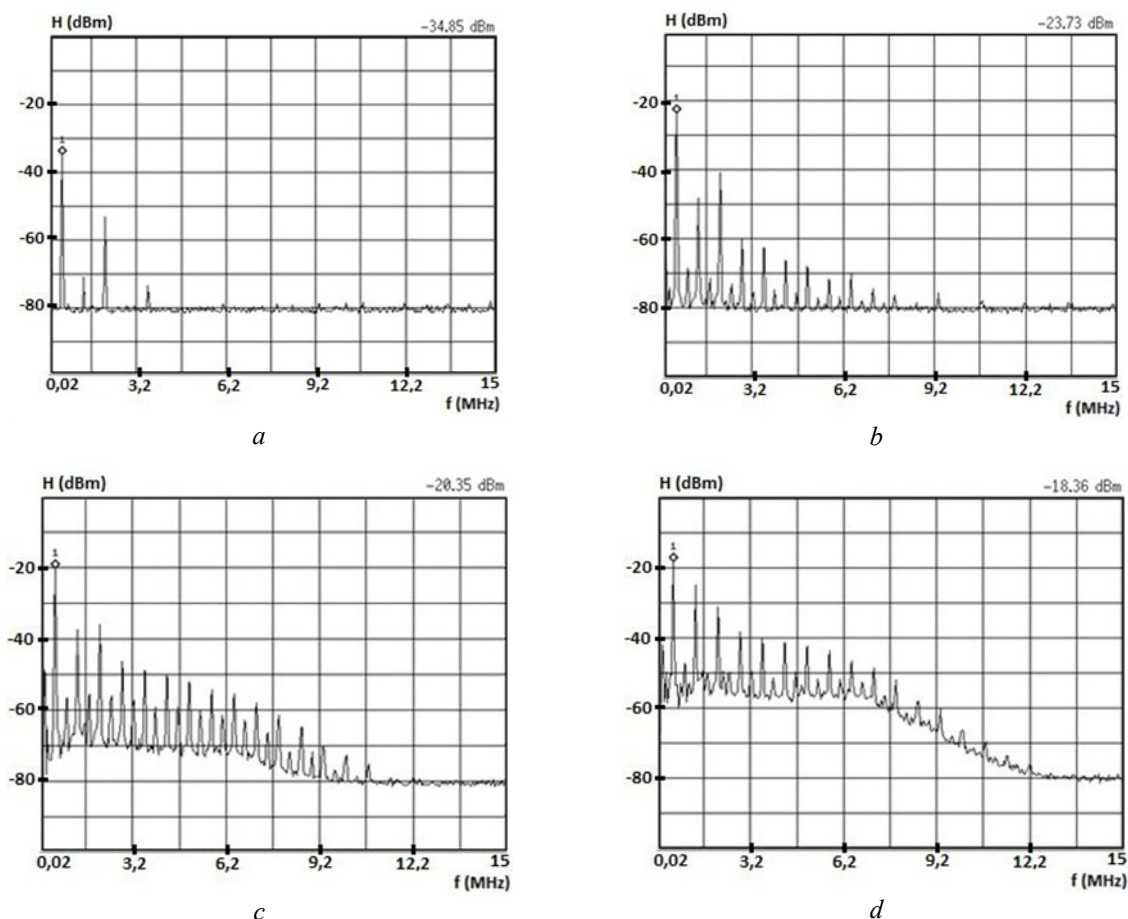
Зависимости, зарегистрированные во втором эксперименте (рис. 2,  $c, d$ ), получены при меньшей длительности импульсов УЗ. Отличаются они от представленных выше, во-первых, тем, что время задержки  $\Delta t$  появления ЗЛ по отношению к моменту включения ультразвука существенно больше, а именно – ЗЛ появляется на 20-й секунде озвучивания (рис. 2  $d$ ). До этого момента величина  $H$  остается постоянной. Далее, скорость роста интенсивности ЗЛ после возникновения кавитации существенно выше, а скорость уменьшения  $H$  – ниже, чем при  $\tau = 5$  мс. Последнее указывает на то, что общая плотность кавитационных полостей на первых двух стадиях существенно ниже, чем при  $\tau = 5$  мс. Однако интенсивность ЗЛ при этом не ниже. Из этого можно сделать вывод, что при  $\tau = 1$  мс эффективность преобразования и концентрации энергии ультразвука кавитационными пузырьками выше при  $\tau = 1$  мс, чем при  $\tau = 5$  мс.

Увеличение времени задержки  $\Delta t$  при уменьшении длительности импульсов ультразвукового поля  $\tau$  и постоянном периоде следования импульсов  $T$  обусловлено закономерностями генерирования кавитации в таких полях. Уменьшение  $\tau$  при постоянном  $T$  означает увеличение длительности промежутка времени между двумя последовательными

импульсами. В этом промежутке времени размеры зародышей кавитации уменьшаются за счет диффузии газа из пузырька в жидкость под действием поверхностного натяжения [10]. В результате при уменьшении  $\tau$  развитие кавитационной области затормаживается, и время задержки увеличивается. Следовательно, варьируя параметры импульсов  $T$  и  $\tau$ , можно управлять динамикой развития кавитационной области.

На четвертой стадии развития кавитационной области интенсивность ЗЛ выходит на плато (при  $t > 28$  с на рис. 2, б и при  $t > 35$  с на рис. 2, д) и мало меняется с течением времени. Поглощение ультразвука при этом несколько уменьшается, на что указывает увеличение интенсивности выходного сигнала датчика.

На рис. 3 представлена эволюция спектров кавитационного шума. Спектры на рис 3, а, б, соответствующие первой и второй стадиям эволюции кавитационной области, характеризуются низкой интенсивностью гармоник в НЧ области ( $< 5f_0$ ), полным их отсутствием в ВЧ области ( $> 5f_0$ ), а также отсутствием непрерывной составляющей кавитационного шума. Исходя из этого, можно сделать вывод о незначительной концентрации пузырьков в кавитационной области, а также о линейном характере их пульсаций. Спектр на рис 3, с, соответствующий третьей стадии эволюции кавитационной области, характеризуется появлением значительной непрерывной составляющей кавитационного шума, а также наличием гармоник в ВЧ части спектра. При дальнейшем развитии кавитационной области (рис. 3, д) достигается максимум непрерывной составляющей кавитационного шума.



**Рис. 3.** Эволюция спектров кавитационного шума по мере развития кавитационной области: а – первая стадия; б – вторая стадия; с – третья стадия; д – четвертая стадия. Частота ультразвука  $f_0 = 720$  кГц, излучаемая мощность 1,7 Вт, период следования импульсов ультразвука 75 мс, длительность импульсов ультразвука  $\tau = 5$  мс

**Fig. 3.** The evolution of cavitation noise spectra as the cavitation field develops: а – first stage; б – second stage; с – third stage; д – fourth stage. The frequency of ultrasound is  $f_0 = 720$  kHz, the radiated power is 1.7 W, the repetition period of ultrasound pulses is 75 ms, the duration of ultrasound pulses is  $\tau = 5$  ms

Таким образом, анализируя результаты, представленные на рис. 2 и 3, можно выделить четыре стадии эволюции кавитации: первая – возникновение и пульсации пузырьков при отсутствии ЗЛ; вторая – возникновение ЗЛ и последующий ее рост при незначительном увеличении поглощения ультразвука; третья – быстрый рост ЗЛ при практически скачкообразном увеличении поглощения ультразвука; четвертая – стадия равновесия, т. е. насыщение кавитационной области пузырьками. На четвертой стадии интенсивность ЗЛ меняется незначительно, а поглощение ультразвука может несколько уменьшаться. Переход от одной стадии развития кавитационной области к другой сопровождается существенным изменением состава регистрируемых спектров. Это открывает возможность определять стадии развития кавитации, используя спектральный анализ кавитационного шума.

### Заключение

Предложен новый метод исследования акустической кавитации. Сущность метода – в синхронной регистрации нескольких кавитационных эффектов одновременно.

Разработана и апробирована установка, предназначенная для реализации данного метода. Установка обеспечивает возможность регистрации полного выходного сигнала гидрофона, интенсивности свечения, генерируемого в кавитационной области – ЗЛ, спектра кавитационного шума, отдельных его составляющих, а также поглощения ультразвука. Технические характеристики установки позволяют регулировать скорость развития кавитационной области путем варьирования длительности и периода следования импульсов ультразвука и проводить измерения в одинаковых НЧ, ВЧ и взаимодействующих ВЧ и НЧ ультразвуковых полях.

В ходе испытаний установки получены результаты, представляющие значительный интерес с точки зрения уточнения представлений о механизме генерирования кавитационных эффектов. Установлено, что предварительная обработка жидкости в ультразвуковом поле с целью ее дегазации в течение 15–20 мин обеспечивает значительное повышение воспроизводимости измерений, особенно для жидкостей с высоким газосодержанием.

На основании сопоставления результатов синхронной регистрации сигналов датчика кавитации и фотоумножителя показано, что кавитационная область после включения ультразвука проходит четыре стадии развития кавитационной области, различающихся динамикой изменения интенсивности звуколюминесценции и составом регистрируемых при этом спектров кавитационного шума. Сделан вывод о возможности идентификации стадий развития кавитационной области по спектрам кавитационного шума.

### Список литературы

1. Голямина И.П. *Ультразвук: маленькая энциклопедия*. Москва: Советская энциклопедия; 1979.
2. Новицкий Б.Г. *Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах*. Москва: Химия; 1983.
3. Абрамов В.О., Приходько М.В. *Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении*. Москва: Русавиа; 2006.
4. Guimarães J.T., Balthazar C.F., Scudino H., Cruz A.G. High-intensity ultrasound: A novel technology for the development of probiotic and prebiotic dairy products. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;57:12-21. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.004.
5. Кушнер Л.К., Кузьмар И.И., Хмыль А.А., Дежкунов Н.В. Электроосаждение нанокomпозиционных никелевых покрытий при воздействии интенсифицирующих факторов. *Международный журнал. Специальный выпуск: фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах*. 2019;10:355-363.
6. Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G, Meullemiestre A., Fabiano-Tixier A.S., Abert-Vian M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;34:540-556. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.
7. Жулай Ю.А., Скосарь В.Ю. Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (обзор). *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013;8/105:7-15.
8. Mason T.J. Therapeutic ultrasound an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011;18:847-852. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.01.004.

9. Сиротюк М. Г. *Акустическая кавитация*. Москва: Наука; 2008.
10. Leighton T.G. *Acoustic Bubble*. London: Pergamon Press; 1995.
11. Dezhkunov N.V., Francescutto A., Serpe L., Canaparo R., Cravotto G. Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;40:104-109 DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004.

### References

1. Goljamina I.P. [*Ultrasound: a small encyclopedia*]. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1979. (in Russ.)
2. Novitsky B.G. [*The use of acoustic vibrations in chemical-technological processes*]. Moscow: Chemistry; 1983. (in Russ.)
3. Abramov O.V., Prikhodko V.M. [*Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering*]. Moscow: Rusavia; 2006. (in Russ.)
4. Guimarães J.T., Balthazar C.F., Scudino H., Cruz A.G. High-intensity ultrasound: A novel technology for the development of probiotic and prebiotic dairy products. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019; 57:12-21. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.004.
5. Kushner L.K., Kuz'mar I.I., Khmyl A.A., Dezhkunov N.V. Electrodeposition of nanocomposite nickel coatings under the influence of intensifying factors. *Mezhdunarodnyj zhurnal. Specialnyj vypusk: fullereny i nanostruktury v kondensirovannyh sredah = Nanoscience and Technology: An International Journal. Special Issue: Fullerenes and Nanostructures in Condensed Matter*. 2019;10:355-363. (in Russ.)
6. Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G, Meullemiestre A., Fabiano-Tixier A.S., Abert-Vian M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;34:540-556. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.
7. Zhulay Yu.A., Skosar V.Yu. Cavitation as a means of intensification of technological processes. Application experience and prospects (review). *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya = Aerospace engineering and technology*. 2013;8/105:7-15. (in Russ.)
8. Mason T.J. Therapeutic ultrasound an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011;18:847-852. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.01.004.
9. Sirotyuk M.G. [*Acoustic cavitation*]. Moscow: Nauka; 2008. (in Russ.)
10. Leighton T.G. *Acoustic Bubble*. London: Pergamon Press; 1995.
11. Dezhkunov N.V., Francescutto A., Serpe L., Canaparo R., Cravotto G. Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;40:104-109. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004.

### Вклад авторов

Котухов А.В. разработал метод проведения экспериментов, регистрации спектров, проанализировал результаты, оформил статью.

Гаврилюк В.С. разработал и испытал приборы, ПО для проведения экспериментов.

Минчук В.С. провел экспериментальные исследования, оформил статью.

Дежкунов Н.В. выполнил постановку задачи, разработал метод проведения экспериментов, интерпретировал результаты экспериментов.

### Authors' contribution

Kotukhov A.V. developed the method of experimental research, registration of spectra, analysed the results, designed paper.

Gavrilyuk V.S. developed and tested instruments, software for experiments.

Minchuk V.S. conducted experimental studies, designed paper.

Dezhkunov N.V. stated the problem, developed the the method of experimental research, interpreted the results of experiments.

### Сведения об авторах

Котухов А.В., заместитель декана факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гаврилюк В.С., инженер-программист лаборатории 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Минчук В.С., инженер-электроник лаборатории 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дежкунов Н.В., к.т.н., доцент, заведующий лабораторией 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-222-28-64;  
e-mail: kavax@bsuir.by  
Котухов Алексей Валерьевич

### Information about the authors

Kotukhov A.V., Vice Dean of the faculty of Computer-aided Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gavrilyuk V.S., Software Engineer at the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Minchuk V.S., Electronic Engineer at the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dezhkunov N.V., PhD, Associate Professor, Head of the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-29-222-28-64;  
e-mail: kavax@bsuir.by  
Kotukhov Aleksei Valerievich





<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-89-95>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.056.5

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛОВ УТЕЧКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДИСКРЕТНО-КВАНТОВАННОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ

ЖЕЛЕЗНЯК В.К.<sup>1</sup>, ЛАВРОВ С.В.<sup>1</sup>, БАРАНОВСКИЙ М.М.<sup>2</sup>, ФИЛИППОВИЧ А.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет (г. Новополоцк, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь, (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 мая 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Целью статьи является оценка канала утечки дискретно-квантованного речевого сигнала при амплитудно-импульсной модуляции. Дискретно-квантованное преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму рассматривается на примере амплитудно-импульсной модуляции. Разработка математической модели каналов утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании основана на спектральном представлении периодических сигналов рядами Фурье. В качестве измерительного сигнала предложено использовать периодическую импульсную последовательность треугольной формы. Измерительный сигнал треугольной формы имеет преимущество перед гармоническим сигналом в процессе выделения шума квантования, так как позволяет достичь более высокой точности при его обработке. Для оценки защищенности канала, обусловленного амплитудно-импульсной модуляцией, используется гармонический сигнал, сформированный из периодической импульсной последовательности треугольной формы методом преобразования Фурье. В результате построения спектра амплитудно-импульсного модулированного сигнала установлено, что при каждой гармонической составляющей спектра, соответствующей спектру периодической последовательности импульсов, появляются боковые составляющие, соответствующие спектру модулирующего сигнала, которые вместе с низкочастотной составляющей в полосе речевого сигнала формируют канал утечки информации. Наличие в составе спектра амплитудно-импульсного модулированного сигнала исходного модулирующего сигнала позволяет провести оценку защищенности канала утечки речевого сигнала при амплитудно-импульсной модуляции по низкочастотной составляющей модулирующего сигнала. Представленные в статье материалы являются оригинальными и могут быть использованы при оценке защищенности каналов утечки речевых сигналов, преобразованных в цифровую форму. Кроме того, полученные результаты позволяют проводить дальнейшие исследования защищенности речевых сигналов при их обратном преобразовании из цифровой формы в исходный сигнал.

**Ключевые слова:** защита информации, канал утечки речевого сигнала, амплитудно-импульсная модуляция.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Железняк В.К., Лавров С.В., Барановский М.М., Филиппович А.Г. Математическая модель каналов утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 89-95.

## MATHEMATICAL MODEL OF SPEECH SIGNAL LEAKAGE CHANNELS DURING DISCRETE-QUANTIFIED CONVERSION

VLADIMIR K. ZHELEZNIJAK<sup>1</sup>, SERGEI V. LAVROV<sup>1</sup>, MIKHAIL M. BARANOUSKI<sup>2</sup>,  
ANDREI G. FILIPOVICH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)*

<sup>2</sup>*Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus  
(Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 25 May 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The purpose of the article is to estimate the leakage channel of a discrete-quantized speech signal with amplitude-pulse modulation. Discrete-quantized analog-to-digital conversion of signals in the article is considered by the example of pulse-amplitude modulation. Development of mathematical model of speech signal leakage channels during discrete-quantified conversion is based on the spectral representation of periodic signals by Fourier series. A periodic pulse train of triangular shape as a measuring signal is proposed. Measuring signal of triangular shape has an advantage over a harmonic signal in the process of quantization noise extraction because it allows one to achieve higher accuracy during signal processing. To evaluate the channel security caused by amplitude-pulse modulation, a harmonic signal is used, which is generated from a periodic pulse sequence of a triangular shape by the Fourier transform method. As a result of constructing the spectrum of the amplitude-pulse modulated signal, it was found that for each harmonic component of the spectrum corresponding to the spectrum of the periodic sequence of pulses, side components corresponding to the spectrum of the modulating signal appear. This side components, together with the low-frequency component in the band of the speech signal, form an information leakage channel. The presence of source modulating signal in the amplitude-pulse modulated signal spectrum allows one to digest the security of the leakage channel of the speech signal with amplitude-pulse modulation by the low-frequency component of the modulating signal. The materials presented in the article are original and can be used in assessing the security of leakage channels of speech signals converted into digital form. In addition, the results obtained allow further studies of the security of speech signals during their inverse transformation from digital to the original signal.

**Keywords:** information security, speech information leakage channel, pulse-amplitude modulation.

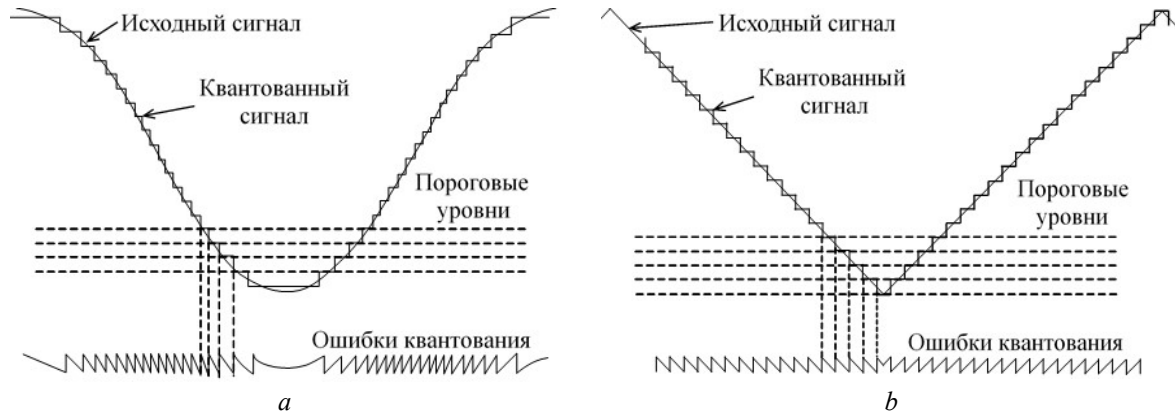
**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Zheleznjak V.K., Lavrov S.V., Baranouski M.M., Filipovich A.G. Mathematical model of speech signal leakage channels during discrete-quantified conversion. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 89-95.

### Введение

Высококачественная высокоскоростная передача по широкополосным каналам аналоговых речевых сигналов дискретно-квантованным представлением обуславливает их различные преобразования, из которых важнейшим является амплитудно-импульсная модуляция. Амплитудно-импульсная модуляция формируется воздействием на периодическую импульсную последовательность в диапазоне частот от 44,1 до 192 кГц прошедшего через аналого-цифровой преобразователь аналогового речевого сигнала [1].

При амплитудно-импульсной модуляции определяются мгновенные значения измерительного сигнала в равноотстоящих друг от друга точках, отсчитываемых по временной шкале через операцию дискретизации, осуществляемую с помощью периодической последовательности прямоугольных импульсов. Процессы дискретизации по времени и квантования по уровню на примере косинусоидального и треугольного сигнала с представлением ошибки квантования представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Квантование сигнала: косинусоидального (а); треугольного (b)  
**Fig. 1.** The quantization of the signal: cosine (a); triangular (b)

Используемые в настоящее время подходы к оценке защищенности каналов утечки речевых сигналов при их преобразовании в цифровую форму сводятся к отдельной оценке аналогового речевого сигнала и речевого сигнала, представленного в цифровой форме при его передаче по линиям связи, а в качестве измерительного сигнала используют, как правило, гармонический сигнал [2, 3].

Для определения каналов утечки речевой информации при ее преобразовании в цифровую форму в качестве измерительного сигнала целесообразно использовать сигнал треугольной формы, который имеет преимущество перед гармоническим сигналом в процессе выделения шума квантования, так как возникающий при этом шум квантования имеет пилообразную форму, что повышает чувствительность его обнаружения [4]. Разложение периодической импульсной последовательности треугольной формы в ряд Фурье имеет следующий вид [5]:

$$f(t) = \frac{8A}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin k\omega t}{k^2}, \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала;  $k$  – номер гармоники ( $k=1,3,5,\dots$ );  $\omega = \frac{2\pi}{T_{\Pi}}$  – угловая частота сигнала;  $T_{\Pi}$  – период сигнала.

Из формулы (1) видно, что для периодической импульсной последовательности треугольной формы четные гармоники отсутствуют, а амплитуды нечетных гармоник убывают пропорционально второй степени номеров гармоник. Поэтому для оценки защищенности канала, обусловленного амплитудно-импульсной модуляцией, в дальнейшем будем использовать гармонический сигнал, сформированный из периодической импульсной последовательности треугольной формы, который соответствует первой (основной) гармонике.

### Спектр сигнала при амплитудно-импульсной модуляции

Определим параметры амплитудно-импульсного модулированного сигнала при воздействии на выделенную гармоническую составляющую путем преобразования Фурье периодической импульсной последовательности треугольной формы и последующей обработки для получения спектра с целью определения утечки информации. Представим модулирующий сигнал  $c(t)$ , выделенный из измерительного сигнала периодической импульсной последовательности треугольной формы преобразованием Фурье, в следующем виде:

$$c(t) = C_{\max} \sin \omega_c t, \quad (2)$$

где  $C_{\max}$  – максимальное значение амплитуды;  $\omega_c$  – частота модулирующего сигнала.

Амплитудно-модулированный сигнал  $s(t)$  представляют следующей формулой [6]:

$$s(t) = [1 + m_a c(t)] f(t), \quad (3)$$

где  $c(t)$  – модулирующий сигнал;  $f(t)$  – периодическая последовательность прямоугольных импульсов;  $m_a$  – коэффициент амплитудной модуляции:

$$m_a = \frac{C_{\max}}{A}, \quad (4)$$

где  $A$  – амплитуда прямоугольных импульсов из периодической последовательности.

Периодическая последовательность прямоугольных импульсов  $f(t)$  с длительностью импульса  $\tau_n$  и периодом  $T_d$  может быть представлена как

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma(t - kT_d), \quad (5)$$

где  $\sigma(t)$  – функция, описывающая одиночный импульс последовательности  $f(t)$ :

$$\sigma(t) = \begin{cases} A & \text{при } -\frac{\tau_n}{2} \leq t \leq \frac{\tau_n}{2}, \\ 0 & \text{при } t < -\frac{\tau_n}{2}, t > \frac{\tau_n}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

Представление периодической последовательности прямоугольных импульсов рядом Фурье с учетом (5) и (6) будет иметь следующий вид [7]:

$$f(t) = A \left[ \frac{\tau_n}{T_d} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi\tau_n}{T_d} \cos 2\pi n F_d t \right], \quad (7)$$

где  $F_d = \frac{1}{T_d}$  – частота дискретизации;  $A \frac{\tau_n}{T_d}$  – постоянная составляющая;  $\frac{2A}{\pi n} \sin \frac{n\pi\tau_n}{T_d} \cos 2\pi n F_d t$  – гармоники частоты дискретизации.

Подставляя в выражение (3), описывающее амплитудно-модулированный сигнал,  $s(t)$  выражения для  $f(t)$  из формулы (7) и  $c(t)$  из формулы (2), получим спектральный состав амплитудно-модулированного сигнала с учетом тригонометрических преобразований:

$$s(t) = \frac{A\tau_n}{T_d} + \frac{m_a A \tau_n \sin \omega_c t}{T_d} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi\tau_n}{T_d} \cos 2\pi n F_d t + \frac{m_a A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi\tau_n}{T_d} \sin (2\pi n F_d \pm \omega_c) t. \quad (8)$$

Согласно формуле (8) спектр амплитудно-импульсного модулированного сигнала содержит:

- постоянную составляющую

$$A_0 = \frac{A\tau_n}{T_d}; \quad (9)$$

- исходный модулирующий сигнал

$$A_c = \frac{m_a A \tau_n}{T_d} \sin \omega_c t; \quad (10)$$

– гармоники частоты дискретизации – модулируемой периодической импульсной последовательности

$$A_n = \frac{2A}{\pi n} \sin \frac{n\pi\tau_n}{T_d} \cos 2\pi n F_d t; \quad (11)$$

- боковые составляющие, соответствующие спектру модулирующего сигнала,

$$A_{n\delta} = \frac{m_a A}{\pi n} \sin \frac{n\pi\tau_n}{T_d} \sin(2\pi n F_d \pm \omega_c) t. \quad (12)$$

Графическое изображение спектра амплитудно-импульсного модулированного сигнала представлено на рис. 2.

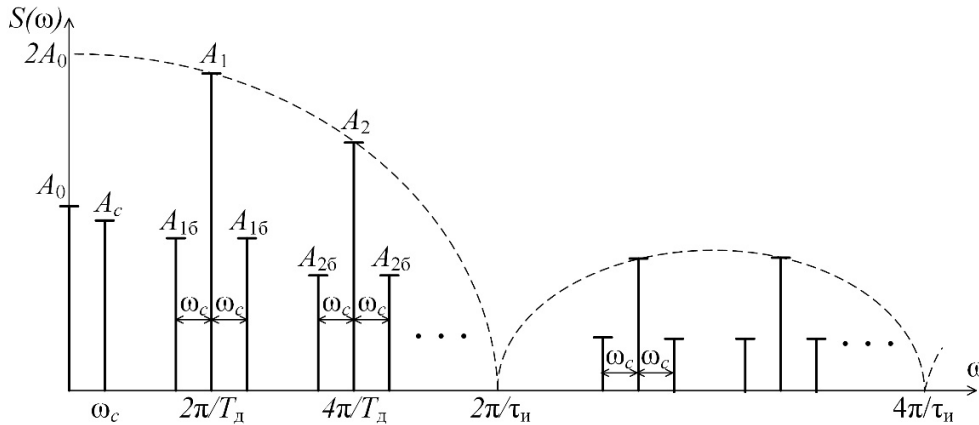


Рис. 2. Спектр амплитудно-импульсного модулированного сигнала  
Fig. 2. The spectrum of the amplitude-pulse modulated signal

Из рис. 2 и формулы (8) следует, что при каждой гармонической составляющей спектра  $A_n$ , соответствующей спектру периодической последовательности импульсов, появляются боковые составляющие  $A_{n\delta}$ , соответствующие спектру модулирующего сигнала, которые вместе с низкочастотной составляющей  $A_c$  в полосе речевого сигнала будут формировать канал утечки информации. Таким образом, утечка речевой информации, преобразованной в цифровую форму, возможна на частотах  $\omega_c$  (низкочастотный канал утечки) и  $2\pi n F_d \pm \omega_c$  (высокочастотный канал утечки). При этом основной причиной формирования дополнительного высокочастотного канала утечки речевой информации при преобразовании ее в цифровую форму являются процессы дискретизации по времени и квантования по уровню речевого сигнала.

Формируемый указанными составляющими канал утечки речевой информации в соответствии с формулами (10) и (12) зависит от коэффициента амплитудной модуляции  $m_a$ , длительности импульса  $\tau_n$  и частоты дискретизации  $F_d$ . Длительность импульса и частота дискретизации, как правило, известны, а величину коэффициента амплитудной модуляции можно определить путем исключения из низкочастотной составляющей модулирующего сигнала  $A_c$  постоянной составляющей  $A_0$ :

$$\frac{A_c}{A_0} = \frac{\frac{m_a A \tau_n}{T_d} \sin \omega_c t}{\frac{A \tau_n}{T_d}} = m_a \sin \omega_c t. \quad (13)$$

Кроме того, наличие в составе спектра амплитудно-импульсного модулированного сигнала исходного модулирующего сигнала позволяет произвести оценку защищенности канала утечки речевого сигнала при амплитудно-импульсной модуляции по низкочастотной составляющей модулирующего сигнала  $A_c$ . Для этого [3]:

1. По полученным значениям параметра измерительного сигнала в точке наблюдения и параметра шума в той же точке наблюдения определяют отношение сигнал/шум.
2. Определяют отношение нормированных параметров сигнала и шума в канале утечки речевого сигнала.

3. Сравнивают отношение сигнал/шум, полученное в процессе оценки в точке наблюдения, с нормированным отношением сигнал/шум из нормированных параметров. Если отношение сигнал/шум нормированных параметров больше отношения измеренных параметров, то принимают решение о защищенности, т. е. отсутствии канала утечки речевой информации. В противном случае – о наличии канала утечки речевого сигнала.

### Заключение

Таким образом, произведена оценка канала утечки информации при амплитудно-импульсной модуляции исходя из математической модели спектра сигнала. Установлено, что при каждой гармонической составляющей спектра  $A_n$ , соответствующей спектру периодической последовательности импульсов, появляются боковые составляющие  $A_{n6}$ , соответствующие спектру модулирующего сигнала, которые вместе с низкочастотной составляющей  $A_c$  в полосе речевого сигнала формируют канал утечки информации. Наличие в составе спектра амплитудно-импульсного модулированного сигнала исходного модулирующего сигнала позволяет произвести оценку защищенности канала утечки речевого сигнала при амплитудно-импульсной модуляции по низкочастотной составляющей модулирующего сигнала  $A_c$ . При этом оценка защищенности аналогового и дискретно-квантованного речевого сигнала производится по единой методике.

### Список литературы

1. Крухмалев В.В., Гордиенко В.Н. *Основы построения телекоммуникационных систем и сетей*. Москва: Горячая линия – Телеком; 2018.
2. Бузов Г.А. *Защита информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам*. Москва: Горячая линия – Телеком; 2015.
3. Железняк В.К. *Защита информации от утечки по техническим каналам*. Санкт-Петербург: ГУАП; 2006.
4. Железняк В.К., Лавров С.В., Барановский М.М., Филиппович А.Г. Способ оценки защищенности преобразованного в цифровую форму речевого сигнала в каналах утечки информации. *Комплексная защита информации: материалы XXIV научно-практической конференции*. 2019: 53-59.
5. Сергиенко А.Б. *Цифровая обработка сигналов*. Санкт-Петербург: Питер; 2005.
6. Островский Л.А. *Основы общей теории электроизмерительных устройств*. Ленинград: Энергия; 1965.
7. Кэтермоул К.В. *Принципы импульсно-кодовой модуляции*. Москва: Связь; 1974.

### References

1. Krukhmalev V.V., Gordienko V.N. [*Principles of telecommunication systems and networks construction*]. Moscow: Hotline Telecom; 2018. (In Russ.)
2. Buzov G.A. [*Protection of limited access information from leakage through technical channels*]. Moscow: Hotline Telecom; 2015. (In Russ.)
3. Zheleznyak V.K. [*Information leakage protection through technical channels*]. St. Petersburg: SUAI, 2006. (In Russ.)
4. Zheleznyak V.K., Lavrov S.V., Baranouski M.M., Filipovich A.G. [A method for assessing the security of a digitized speech signal in an information leakage channel]. *Integrated information protection: materials of the XXIV scientific-practical conference*. 2019; 53-59. (In Russ.)
5. Sergienko A.B. [*Digital signal processing*]. St. Petersburg: Peter; 2005. (In Russ.)
6. Ostrovsky L.A. [*Principles of the general theory of electrical measuring devices*]. Leningrad: Energy; 1965. (In Russ.)
7. Cathermole C.V. [*Principles of Pulse Code Modulation*]. Editor: V.V. Markov. Moscow: Communication, 1974. (In Russ.)

### Вклад авторов

Железняк В.К. определил замысел исследования, осуществил окончательное утверждение рукописи для публикации, ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Лавров С.В. принимал участие в разработке математической модели и способа оценки защищенности канала утечки речевого сигнала.

Барановский М.М. принимал участие в разработке математической модели и интерпретации полученных результатов, осуществил редактирование и оформление статьи для публикации.

Филиппович А.Г. осуществил критический пересмотр статьи в части значимого интеллектуального содержания, вносил правки в текст статьи.

### Authors' contribution

Zheleznjak V.K. defined the concept of research and delivered the final approval of the manuscript for publication, including its critical review in part of significant intellectual content.

Lavrov S.V. participated in the development of the mathematical model and method for evaluating the security of a speech leakage channel.

Baranouski M.M. participated in the development of the mathematical and in the interpretation of the results, prepared the article for publication.

Filipovich A.G. included its critical review in part of significant intellectual content, edited the text of the article.

### Сведения об авторах

Железняк В.К., д.т.н., профессор, заведующий научно-исследовательской опытно-экспериментальной лабораторией технической защиты информации Полоцкого государственного университета.

Лавров С.В., аспирант Полоцкого государственного университета.

Барановский М.М., главный специалист Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь.

Филиппович А.Г., кандидат технических наук, главный специалист Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь.

### Information about the authors

Zheleznjak V.K., D.Sci., Professor, Head of the Research Experimental Laboratory of Technical Information Protection of Polotsk State University.

Lavrov S.V., PG Student of Polotsk State University.

Baranouski M.M., chief specialist of the Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus.

Filipovich A.G., PhD, chief specialist of the Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus.

### Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,  
Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29,  
учреждение образования «Полоцкий  
государственный университет»  
тел. +375-29-212-74-47;  
e-mail: v.zheleznjak@psu.by  
Железняк Владимир Кириллович

### Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,  
Vitebsk region, Novopolotsk, Blokhina str., 29,  
Educational institution «Polotsk  
State University»  
tel. +375-29-212-74-47;  
e-mail: v.zheleznjak@psu.by  
Zheleznjak Vladimir Kirilovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-96-112>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 621.396.218:614.89.086.5

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ РАДИОЧАСТОТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОЖЕТ ВЛИЯТЬ НА УРОВЕНЬ СМЕРТНОСТИ ОТ COVID-19. 4G/5G/6G МОГУТ БЫТЬ БЕЗОПАСНЫМИ ДЛЯ ЛЮДЕЙ

МОРДАЧЕВ В.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 15 июня 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Охватившая весь земной шар пандемия коронавируса COVID-19 явилась причиной смерти сотен тысяч людей и глубоких кризисных явлений в мировой экономике. В работе приводится косвенное подтверждение гипотезы, что, наряду с другими факторами, на уровень смертности населения от коронавирусной инфекции оказывает влияние уровень электромагнитного загрязнения среды обитания. Гипотеза подтверждается наличием корреляции между степенью жесткости гигиенического нормирования уровней радиочастотного электромагнитного фона для населения, главным источником которого являются системы мобильной (сотовой) связи, и уровнем смертности от COVID-19 в различных странах. Эта связь крайне опасна, поскольку реализация существующих планов очень быстрого развития технологий, систем и услуг мобильной связи четвертого (4G) и пятого (5G), а к 2030 году и шестого (6G) поколения, связанного с увеличением на много порядков числа излучающих устройств, скорости передачи данных по радиочастотным каналам и территориальной плотности трафика мобильной связи без принятия специальных мер в самое ближайшее время может вызвать значительный (на 1–2 порядка и более) рост интенсивности электромагнитного фона, создаваемого базовым и абонентским оборудованием мобильной связи. Для количественного анализа этих процессов разработана и верифицирована с использованием результатов многочисленных измерений электромагнитного фона в различных странах практическая методика пессимистической оценки уровня электромагнитного фона, создаваемого этими системами, основные положения которой излагаются в данной работе. Данная методика основана на использовании интегральных системных характеристик беспроводного информационного обслуживания общества и позволяет обосновать необходимые системные, технические и организационные решения, направленные на обеспечение необходимого уровня электромагнитной экологии населенных территорий и электромагнитной безопасности населения в условиях быстрого развития систем 4G/5G/6G без ущерба информационному обслуживанию населения и информационным технологиям в экономике, образовании, здравоохранении и других областях.

**Ключевые слова:** COVID-19, электромагнитное загрязнение, нормы, корреляция сотовая связь, 4G, 5G, 6G, электромагнитная экология, электромагнитная безопасность.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Мордачев В.И. Радиочастотное электромагнитное загрязнение может влиять на уровень смертности от COVID-19. 4G/5G/6G могут быть безопасными для людей. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 96-112.



## COVID-19 LETHALITY RATE MAY BE AFFECTED BY ELECTROMAGNETIC RADIO FREQUENCY POLLUTION. 4G/5G/6G CAN BE SAFE FOR PEOPLE

VLADIMIR I. MORDACHEV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 15 June 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The COVID-19 pandemic, spanning the globe, caused the death of hundreds of thousands of people and crisis in global economy. I found confirmation of the hypothesis that the level of environmental electromagnetic pollution affects the lethality rate of a population from COVID-19. I found a correlation between the degree of severity of hygienic regulation of levels of radio frequency electromagnetic fields for population, the main sources of which are mobile (cellular) communication systems, and the lethality rate from COVID-19 in various countries. The existence of such a correlation is extremely dangerous, because the implementation of well-known road maps for very fast development of technologies, systems and services of the fourth (4G), fifth (5G) and sixth (6G) generations of mobile communications associated with the increase in the number of radiating devices, data rates in radio frequency channels and area traffic capacity of mobile communications by many orders of magnitude, according to my estimates, can cause a high (1–2 orders or more) increase in the intensity of electromagnetic background created by mobile communications. For a quantitative analysis of these processes, I developed a presented herein a practical technique for worst-case estimation of the level of electromagnetic background created by these systems; it is verified using the published results of measurements of electromagnetic background in various countries. This technique is based on the use of the integrated system characteristics of wireless information services and makes it possible to justify the necessary system, technical and managerial solutions aimed at ensuring the necessary level of electromagnetic ecology of populous areas and electromagnetic safety of people in conditions of rapid advancement of 4G/5G/6G systems without affecting the quality of informational support of the population and information technologies in economy, education, healthcare and other sectors.

**Keywords:** COVID-19, electromagnetic pollution, regulations, correlation, mobile communications, 4G, 5G, 6G, electromagnetic ecology, electromagnetic safety.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Mordachev V.I. COVID-19 lethality rate may be affected by electromagnetic radio frequency pollution. 4G/5G/6G can be safe for people. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 96-112.

### Relevance of the Problem

Due to the extremely intensive development of wireless technologies and systems of public information services and their deep penetration into all areas of human activity, the electromagnetic (EM) pollution associated with these processes is becoming an increasingly threatening anthropogenic factor. Its danger, as a rule, is underestimated, and in the coming years may turn out to be commensurate with the danger of the known processes of global warming and environmental degradation.

Numerous measurements of the levels of electromagnetic background (EMB) generated by cellular communications (CC) in places with different population density in 2005-2019 [1–11, etc.] indicate that CC radio networks of the second (GSM, IS-95) and the third (UMTS, CDMA2000) generations, which provided the bulk of mobile telephony services and a relatively small volume of mobile Internet services during measurement periods, as a whole, posed no danger for the population. In the places where these measurements were carried out, the area density of sources of radio frequency EM radiation did not exceed  $10^3$ – $10^4$  devices/km<sup>2</sup>, the area traffic capacity (ATC) did not exceed 0.1–1.0 kbit/s/m<sup>2</sup> at data rates on the radio channels of user's interface no higher than 0.032–2.0 Mbit/s. As a result, the intensity of EM background created by these sources was

no more than a few  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  in the overwhelming majority of cases, not exceeding the level of  $9.5\text{--}10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , defined in many countries (Azerbaijan, Belarus, Bulgaria (short-term), Canada (Toronto), Chile (sensitive), France (Paris), Hungary, Italy (general), Kazakhstan, Lithuania, Poland, Russia, Switzerland, Ukraine, etc.) [12] as the maximum permissible level (MPL) of EM background intensity for population.

In the early periods of CC development (first and second generations of CC), when the main type of service was mobile telephony, uplink and downlink traffic rates (the amount of information transmitted from mobile (MS) to the base (BS) station and vice-versa) were symmetrical, it was supposed that the main hazard to health is brought about by EM radiation of CC MS, since the mobile phone is located near the human body, and voluntary environmental risks during the CC operation are predominant.

However, as a result of the subsequent evolution of CC in the direction of intensive development of data transmission technologies and services (mobile Internet, interactive broadcasting, etc.), the situation has changed quite significantly, giving the room for the following to take place:

- a constant decrease in the average range of cellular radio-telephone communications with a corresponding decrease in the average power of MS EM radiation in this mode and an attendant decrease in voluntary environmental risks due to the fast development of the CC radio network infrastructure and the increasing use of indoor hotspots, urban micro-cells, etc. [13];
- a constantly increasing asymmetry of downlink and uplink traffic rates, the ratio of capacities of information transmitted from BS to MS and in the opposite direction reaches  $10\text{--}100$  [14] with a corresponding change in the ratio of EM energy radiated by sets of BS and MS;
- as a result, the environmental risks caused by the increased intensity of EM background created by CC, come to the fore and become predominant.

The observed dynamic evolution of CC generations from 2G (GSM, IS-95) and 3G (UMTS, CDMA2000) to the 4G (LTE) [13–15], and then to the upcoming 5G [16–18] and 6G [19, 20] is an inevitable process, due to the highest efficiency of digital mobile communication systems in almost all areas of human activity and the extreme attractiveness of a wide range of wireless information services.

Let us consider the summary data of Table 1, characterizing the planned growth of six main system parameters of wireless information services in near future. An increase in the values of parameters No. 1, 2, 3, 4 is associated with a proportional increase in the power of EM radiations of BS and MS of CC, and an increase in the values of parameters No. 5, 6 provides a proportional decrease in this power. Moreover, the aforementioned parameters experience an increase for the following reasons:

- the expected cumulative increase in parameters No. 1, 2, 3, 4 is at least  $\approx 10^4$  times for  $4\text{G} \rightarrow 5\text{G}$  evolution, and the same  $\approx 10^4$  times for  $5\text{G} \rightarrow 6\text{G}$  evolution (in total about 8 orders of magnitude for  $4\text{G} \rightarrow 6\text{G}$  evolution), and
- the expected total increase in parameters No. 5, 6 is only  $\approx 30\text{--}300$  times for  $4\text{G} \rightarrow 5\text{G}$  evolution, and  $50\text{--}1000$  times for  $5\text{G} \rightarrow 6\text{G}$  evolution (in total no more than 3–4 orders of magnitude for  $4\text{G} \rightarrow 6\text{G}$  evolution taking into account the uncertainty of estimates [16–20]), the declared development of mobile communications from 4G to 5G and further to 6G using traditional approaches can cause a sharp (by several orders of magnitude!) increase in the intensity of EM background created by CC in places with a high population density, and a corresponding sharp degradation of the environmental EM ecology, and, in general, an unacceptable reduction of public EM safety.

On the one hand, such prospects are a cause of growing concern about the health and well-being of population, which may result in local government-level decisions that restrict the use of wireless services in critical places, such as decisions [21–23] adopted in Switzerland and France in order to limit the use of wireless solutions and services in buildings and in public transport.

**Table 1.** Summary data characterizing the planned evolution of the system parameters of mobile communication networks, according to [15–20]

**Таблица 1.** Сводные данные, характеризующие планируемую эволюцию системных параметров сетей мобильной связи, по данным [15–20]

System parameters Системные параметры	Generation of mobile (cellular) communications Поколение мобильной (сотовой) связи			Total increase in evolution 4G→6G Суммарный рост при эволюции 4G→6G
	4G	5G	6G	
1. Peak data rate	100 Mb/s	10–20 Gb/s	≥1 Tb/s	≈10 <sup>4</sup> times
2. Experienced data rate	10 Mb/s	0.1 Gb/s	1–10 Gb/s	≈10 <sup>2</sup> times
3. Area traffic capacity	0.1 Mb/s/m <sup>2</sup>	10 Mb/s/m <sup>2</sup>	1 Gb/s/m <sup>2</sup>	≈10 <sup>4</sup> times
4. Connectivity density (density of radiating MS)	0.1 Devices/m <sup>2</sup>	1.0 Devices/m <sup>2</sup>	10 Devices/m <sup>2</sup>	≈10 <sup>2</sup> times
5. Spectrum efficiency	1 <sup>x</sup>	3 <sup>x</sup> that of 4G	(5–10) <sup>x</sup> that of 5G	≈15–30 times
6. Network energy efficiency	1 (relative base level)	10–100 times increase compared to 4G	10–100 times increase compared to 5G	≈10 <sup>2</sup> –10 <sup>4</sup> times

On the other hand, there is a noticeable worry that such local government decisions, as well as growing radio phobia of population, can impede the CC development on a scale and pace [16–20]. Apparently, this was the reason for the emergence of the latest corporate recommendations ICNIRP [24], declaring the safety of 5G systems and services at levels of radio frequency EM background that 100 times or more higher than the MPL of EM background accepted in many countries.

It should be noted that these recommendations, taking into account only the thermal effect of radio frequency EM fields on human body, determining upper boundary of the range of their supposedly safe intensity at a level of 10 W/m<sup>2</sup> (1000 μW/cm<sup>2</sup>) and above, and allowing them to heat the human upperparts to 2 degrees and some parts of the body up to 5 degrees in 6 minutes, are extremely optimistic from the point of view of EM safety of the population. They have a pronounced corporate character, do not take into account various non-thermal effects of exposure to radio-frequency EM fields [25–36, etc.] and, apparently, can only illustrate the boundaries between the non-fatal and fatal effects of radio-frequency EM fields on human body.

Such levels of EM exposure actually correspond to the modes of gentle defrosting of food products in a microwave oven and, in the author’s deep assurance, cannot be considered as acceptable for the whole population.

The author is sure that MPL values of EM fields of the order of 2.5–10 μW/cm<sup>2</sup> (0.025–0.1 W/m<sup>2</sup>), accepted in many countries as a result of in-depth scientific research and many years of analysis of the health of separate population groups subjected to forced or voluntary exposure to radio-frequency EM fields, and reflecting the real danger of non-thermal effects of exposure to these fields on the human body, are more adequate to the required degree of protection of the population from EM background created by modern and future CC systems.

These effects, in particular, are associated with impairing of nervous and mental activity [26–30], decreasing of reproductive function in both men and women [31, 32], and an appreciable increase in DNA damage [32], impairing of heart rhythm and peripheral arterial pressure [33, 34], suppression of the immune system [35, 36], when exposed to radio frequency EM fields with levels significantly lower than those recommended in [24]; finally, by a WHO decision [37], radio-frequency EM fields are classified as a potentially carcinogenic hazard.

### **Correlation between EM environmental pollution and harm to population by COVID-19**

Quite numerous publications, such as [25–37], make us take a fresh look at the causes of a rather uneven harm to population by the COVID-19 in different countries. In conditions of complete “multilayer” area coverage (i. e. coverage by several radio networks of various operators) with mobile communications, the effect of the adopted restrictions on MPL of radio frequency EM fields on the population’s exposure to infections like COVID-19 is apparently inevitable.

Although a large number of other factors (the degree of general environmental pollution, food quality, climate features, epidemic phase, timeliness and effectiveness of restrictive measures taken, etc.) affects public health and susceptibility of the population to infections, and also data of different countries on morbidity and lethality have a different degree of reliability and reflect the different effectiveness of national health systems in struggle with COVID-19, today one cannot fail to see the area correlation between the use of recommendations [24] and the distribution of lethality from COVID-19.

In particular, an analysis of WHO reports [38–40] indicates that in a group of countries where, according to data [12], hygienic restrictions on radio frequency EM fields of 1–10  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  are accepted, the relative level of lethality from COVID-19 is (1–5) % of the number of the infected, and in a group of countries where the hygienic regulation of EMB is carried out in accordance with corporate recommendations [24], this level is (5–20) %.

Tables 2 and 3 shows the results of a correlation analysis of the relationship between the degree of severity of hygienic regulation of levels of radio frequency EM background for the population in different countries according to data [12] and the lethality rate from COVID-19 in relation to the number of people infected according to [38–40].

The data in Table 2 were obtained for the first version of definition of the relative lethality rate from COVID-19 as the ratio of the total number of deaths to the total number of the infected, and the data in Table 3 correspond to the second version of its definition as the ratio of the number of deaths to the country's population in millions of people.

In this analysis, the representativeness of the samples is ensured by quota sampling – ensuring approximately equal representation of data from countries of both groups; the limited sample size is caused by the lack of more complete data on hygienic regulation of EMF in the countries listed in [38–40].

When determining the relative lethality rate as the ratio of the number of deaths to the total number of the infected, the Pearson's correlation coefficient for the three different correlated samples turned out to be 0.551–0.552. When determining the relative lethality rate as the ratio of the number of deaths to the total country population, the Pearson's correlation coefficient for these samples was even higher, i.e 0.577–0.6. This convincingly confirms the existence of a correlation between the factors under consideration.

The detected correlation is quite stable - its multivariate analysis when varying MPL values for countries where MPL value pairs are used (for Bulgaria (“long-term”/“short-term”) and Chile (“sensitive”/“others”), which differ by 10 times), as well as when trying correction of lethality for some countries suspected of distorting medical statistics, indicates that in all cases the resulting Pearson's correlation coefficient turned out to be no lower than 0.45–0.55.

Of course, the hygienic regulation of MPL radio frequency EMB in accordance with [24], or the absence of such regulation in a number of countries does not mean the mandatory presence of high levels of environmental EM pollution by CC systems.

However, taking into account the extremely high cost of the existence of a relation between the degree of environmental EM pollution and the degree of population susceptibility to similar viral infections, the presence of a relationship between the average levels of radio frequency EM background created by CC systems and the lethality rate from COVID-19 requires the most serious further research and verification.

And if the correlation between the average levels of EM background created by CC systems and the injury of population by COVID-19 will be confirmed by further in-depth studies (which is quite probable, taking into account a very large difference between the “thermal” and “non-thermal” MPL of radio frequency EM fields), this may serve as an objective motivation for the following:

- for much closer attention to the problem of EM pollution of populous areas and, in particular, a more objective critical attitude to corporate declarations like [24], and
- for making decisions similar to [21–23] at the national or regional levels, as well as for searching for reasonable system and technological alternatives to a number of declared directions for the extremely rapid development of 4G/5G/6G systems and for the upcoming extremely deep penetration of wireless technologies and services in all areas of human activities, without prejudice to progress in the field of information technology and public, industrial, educational and other information services.

The fundamental difficulties in justification of such decisions, system and technological alternatives are caused by the lack of adequate practical methods for predicting and evaluating the expected levels of EM background at different stages of the development and implementation of 4G/5G/6G systems and services, since the direct calculation of the total background intensity created by a huge number of stationary (BS ) and mobile (MS) sources of EM radiation, is impossible both because of the extreme complexity of this mission, and due to significant a priori uncertainty and confidentiality of the source data.

**Table 2.** Results of the analysis of a correlation between the degree of severity of hygienic regulations of levels of radio frequency EM background for the population in different countries according to data [12], and the relative lethality rate from COVID-19, defined as the ratio of the number of deaths to the total number of the infected, according to [38–40]

**Таблица 2.** Результаты анализа корреляции между степенью жесткости гигиенического нормирования уровней радиочастотного электромагнитного фона для населения в различных странах, по данным [12], и относительным уровнем смертности от COVID-19, определяемым как отношение числа умерших к общему числу заразившихся, по данным [38–40]

Country	MPL, W/m <sup>2</sup>	The ratio of the total number of deaths to the total number of infected					
		04.05.2020 WHO Rep. 105	%	11.05.2020 WHO Rep. 112	%	18.05.2020 WHO Rep. 119	%
Страна	ПДУ, Вт/м <sup>2</sup>	Отношение числа умерших к общему числу заразившихся					
		04.05.2020 WHO Rep. 105	%	11.05.2020 WHO Rep. 112	%	18.05.2020 WHO Rep. 119	%
1. Azerbaijan	0.1	25/1932	1.29	32/2519	1.27	39/3274	1.19
2. Belarus	0.1	103/17489	0.59	135/23906	0.56	165/29650	0.56
3. Belgium	10	7844/49906	15.72	8656/53081	16.31	9052/55280	16.37
4. Bulgaria <sup>1)</sup>	0.01	73/1618	4.51	91/1965	4.63	110/2235	4.92
5. Canada	4	3681/59365	6.20	4728/67996	6.95	5702/76204	7.48
6. Chile <sup>1)</sup>	0.1	260/19663	1.32	312/28866	1.08	450/43781	1.03
7. China	0.4	4643/84400	5.50	4643/84450	5.50	4645/84494	5.50
8. Denmark	10	484/9523	5.08	529/10429	5.07	547/10927	5.01
9. France	10	24859/129708	19.17	26338/137073	19.21	28059/140036	20.04
10. Germany	10	6692/163175	4.10	7417/169575	4.37	7935/174697	4.54
11. UK	10	28446/186603	15.24	31855/219187	14.53	34636/243699	14.21
12. Hungary	0.1	351/3035	11.57	421/3284	12.82	462/3535	13.07
13. India	0.9	1373/42533	3.23	2206/67152	3.29	3029/96169	3.15
14. Ireland	10	1303/21506	6.06	1458/22996	6.34	1543/24112	6.40
15. Israel	0.9	227/16152	1.41	254/16492	1.54	271/16607	1.63
16. Italy	0.1	28884/210717	13.71	30560/219070	13.95	31908/225435	14.15
17. Japan	10	510/15057	3.39	621/15798	3.93	749/16305	4.59
18. Kazakhstan	0.1	27/3988	0.68	31/5138	0.60	34/6440	0.53
19. Lithuania;	0.1	46/1410	3.26	50/1479	3.38	56/1541	3.63
20. Luxembourg	0.45	96/3824	2.51	101/3886	2.60	107/3945	2.71
21. Netherlands	10	5056/40571	12.46	5440/42627	12.76	5680/43995	12.91
22. Poland	0.1	678/13693	4.95	800/15996	5.00	925/18529	5.00
23. Portugal	10	1043/25282	4.13	1135/27581	4.12	1218/29036	4.19
24. Russia;	0.1	1356/145268	0.93	2009/221344	0.91	2722/290678	0.94
25. Spain	10	25264/217466	11.62	26621/224390	11.86	27650/231350	11.95
26. Sweden;	10	2679/22317	12.00	3225/26322	12.25	3679/30143	12.21
27. Switzerland	0.1	1472/29822	4.94	1537/30222	5.09	1602/30504	5.25
28. Turkey	0.56	3397/126045	2.70	3786/138657	2.73	4140/149435	2.77
29. Ukraine	0.1	303/12331	2.48	408/15648	2.61	535/18616	2.87
30. USA	10	60710/1125719	5.39	76916/1271645	6.05	87180/1432265	6.09
31. Uzbekistan	0.025	10/2160	0.46	10/2411	0.41	12/2762	0.43
<b>Pearson's correlation coefficient:</b>			<b>0.551</b>		<b>0.552</b>		<b>0.551</b>

<sup>1)</sup> The lower limit of the range of normalized values.

**Table 3.** Results of the analysis of a correlation between the degree of severity of hygienic regulations of levels of radio frequency EM background for the population in different countries according to data [12], and the relative lethality rate from COVID-19, defined as the ratio of the number of deaths according to [38–40], to the total country population in millions of people <sup>1)</sup>

**Таблица 3.** Результаты анализа корреляции между степенью жесткости гигиенического нормирования уровней радиочастотного электромагнитного фона для населения в различных странах, по данным [12], и относительным уровнем смертности от COVID-19, определяемым как отношение числа умерших, по данным [38–40], к общей численности населения в миллионах чел. <sup>1)</sup>

Country	MPL, W/m <sup>2</sup>	The ratio of the total number of deaths to the country population					
		04.05.2020 WHO Rep. 105	Total	11.05.2020 WHO Rep. 112	Total	18.05.2020 WHO Rep. 119	Total
Страна	ПДУ, Вт/м <sup>2</sup>	Отношение числа умерших к общей численности населения					
		04.05.2020 WHO Rep. 105	Всего	11.05.2020 WHO Rep. 112	Всего	18.05.2020 WHO Rep. 119	Всего
1. Azerbaijan	0.1	25/10.139	2.47	32/10.139	3.16	39/10.139	3.85
2. Belarus	0.1	103/9.449	10.9	135/9.449	14.3	165/9.449	17.5
3. Belgium	10	7844/11.590	677	8656/11.590	747	9052/11.590	781
4. Bulgaria <sup>2)</sup>	0.01	73/6.948	10.5	91/6.948	13.1	110/6.948	15.8
5. Canada	4	3681/37.742	97.5	4728/37.742	125	5702/37.742	151
6. Chile <sup>2)</sup>	0.1	260/19.116	13.6	312/19.116	16.3	450/19.116	23.5
7. China	0.4	4643/1439.324	3.23	4643/1439.324	3.23	4645/1439.324	3.23
8. Denmark	10	484/5.792	83.6	529/5.792	91.3	547/5.792	94.4
9. France	10	24859/65.274	381	26338/65.274	403	28059/65.274	430
10. Germany	10	6692/83.784	79.9	7417/83.784	88.5	7935/83.784	94.7
11. UK	10	28446/67.886	419	31855/67.886	469	34636/67.886	510
12. Hungary	0.1	351/9.660	36.3	421/9.660	43.6	462/9.660	47.8
13. India	0.9	1373/1380.004	0.995	2206/1380.004	1.60	3029/1380.004	2.19
14. Ireland	10	1303/4.938	264	1458/4.938	295	1543/4.938	312
15. Israel	0.9	227/8.656	26.2	254/8.656	29.3	271/8.656	31.3
16. Italy	0.1	28884/60.462	478	30560/60.462	505	31908/60.462	528
17. Japan	10	510/126.76	4.03	621/126.476	4.91	749/126.476	5.92
18. Kazakhstan	0.1	27/18.777	1.44	31/18.777	1.65	34/18.777	1.81
19. Lithuania	0.1	46/2.722	16.9	50/2.722	18.4	56/2.722	20.6
20. Luxemburg	0.45	96/0.626	153	101/0.626	161	107/0.626	171
21. Netherlands	10	5056/17.135	295	5440/17.135	317	5680/17.135	331
22. Poland	0.1	678/37.847	17.9	800/37.847	21.1	925/37.847	24.4
23. Portugal	10	1043/10.197	102	1135/10.197	111	1218/10.197	119
24. Russia;	0.1	1356/146.796	9.24	2009/146.796	13.7	2722/146.796	18.5
25. Spain	10	25264/46.755	540	26621/46.755	569	27650/46.755	591
26. Sweden;	10	2679/10.099	265	3225/10.099	319	3679/10.099	364
27. Switzerland	0.1	1472/8.655	170	1537/8.655	178	1602/8.655	185
28. Turkey	0.56	3397/84.339	40.3	3786/84.339	44.9	4140/84.339	49.1
29. Ukraine	0.1	303/42.156	7.19	408/42.156	9.68	535/42.156	12.7
30. USA	10	60710/331.003	183	76916/331.003	232	87180/331.003	263
31. Uzbekistan	0.025	10/33.469	0.299	10/33.469	0.299	12/33.469	0.359
<b>Pearson's correlation coefficient:</b>			<b>0.577</b>		<b>0.593</b>		<b>0.60</b>

<sup>1)</sup> Country population is given according to <https://www.worldometers.info/world-population/>  
<sup>2)</sup> The lower limit of the range of normalized values.

These difficulties can be effectively overcome by using my technique [41–51] of worst-case system analysis of EM background created by CC, which allows to perform the pessimistic estimation of EM background average intensity near the ground surface with the use of integral system CC parameters, given in Table 1.

The adequacy of this technique is confirmed by its verification [49, 52] using a numerous results [1–11] of measurements of EM background created by 2G/3G CC in many countries.

### Technique of worst-case system analysis of EM background created by CC

This technique offers a number of useful expressions and procedures for worst-case estimation of the average level of EMB created by radio frequency EM fields that are generated by sets of BS and/or MS of CC at the observation point (OP) at a height of  $H_{OP} = 1 \dots 2$  m near the earth's surface (Fig. 1, 2).

In accordance with this technique, the total EM background intensity  $Z_{\Sigma}$  [W/m<sup>2</sup>] in OP means the scalar sum of values of power flux densities  $Z_n$  of EM fields created by  $N$  sources of these fields located in an area of radio visibility of these sources from the OP:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N Z_n. \quad (1)$$

#### EM background Intensity created by BS of CC

The average total intensity  $Z_{\Sigma BS}$  [W/m<sup>2</sup>] of EM background created in OP near the ground surface by a set of BS located randomly uniformly (with respect to the OP position) in the area of BS radio visibility from the OP, is determined by the following expression [44, 46, 47]:

$$Z_{\Sigma BS} = Z_{\Sigma BS1} + Z_{\Sigma BS2} = \frac{B_{BS}}{2} \ln \left( \frac{4H_{OP}\sqrt{e}}{\lambda} \right) \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \left( \frac{6.6 \cdot H_{OP}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}, \quad (2)$$

$$Z_{\Sigma BS1} = \frac{B_{BS}}{2} \ln \left( \frac{4H_{OP}}{\lambda} \right), \quad Z_{\Sigma BS2} = \frac{B_{BS}}{4}, \quad (3)$$

where  $\lambda$  is the wavelength of BS radiation,  $B_{BS}$  [W/m<sup>2</sup>] is the average specific electromagnetic loading on area (SEMLA) created by BS in the considered area.

The SEMLA  $B_{BS}$  [W/m<sup>2</sup>] created by the set of  $K$  BS which are EMR sources, distributed over the area  $S$ , is defined as a sum of covering total radiated powers  $P_{ek}$  of these BS per unit area:

$$B_{BS} = \frac{\sum_{k=1}^K P_{ek}}{S}, \quad P_{ek} \approx Q_k P_{EIRPk}, \quad (4)$$

where  $P_{EIRPk}$  is the equivalent isotropic radiated power (EIRP) of  $k$ -th BS in the main lobe of its antenna;  $Q_k = P_{ARK}/P_{EIRPk} \leq 1$  is the system parameter of EMR directivity of  $k$ -th BS; in this ratio  $P_{ARK}$  and  $P_{EIRPk}$  are the values of this BS average total radiating power which reaches an observation area by the real BS antenna with horizontal and vertical selectivity, and by the ideal isotropic antenna with the same antenna gain, correspondingly. In particular, if CC radio network is regular with  $N_S$  sectors on each BS, then for worst-case estimations  $Q_k \approx 1/N_S$  can be used. For separate  $k$ -th BS with a sector antenna with  $\Delta\alpha_k$  [rad] of main beam width that is usually inclined 5–10 degrees to the earth's surface, it is possible to use  $Q_k \approx \Delta\alpha_k/2\pi$ .

The average EMB intensity (2) created by BS consists of two components (3): frequency dependent component  $Z_{\Sigma BS1}$  corresponds to the contribution of BS located in the OP vicinity of free-space radio waves propagation (RWP) between BS and OP (breakpoint vicinity [53]), and frequency independent component  $Z_{\Sigma BS2}$  corresponds to the contribution of BS located outside the breakpoint vicinity in the area of interference (multipath) RWP.

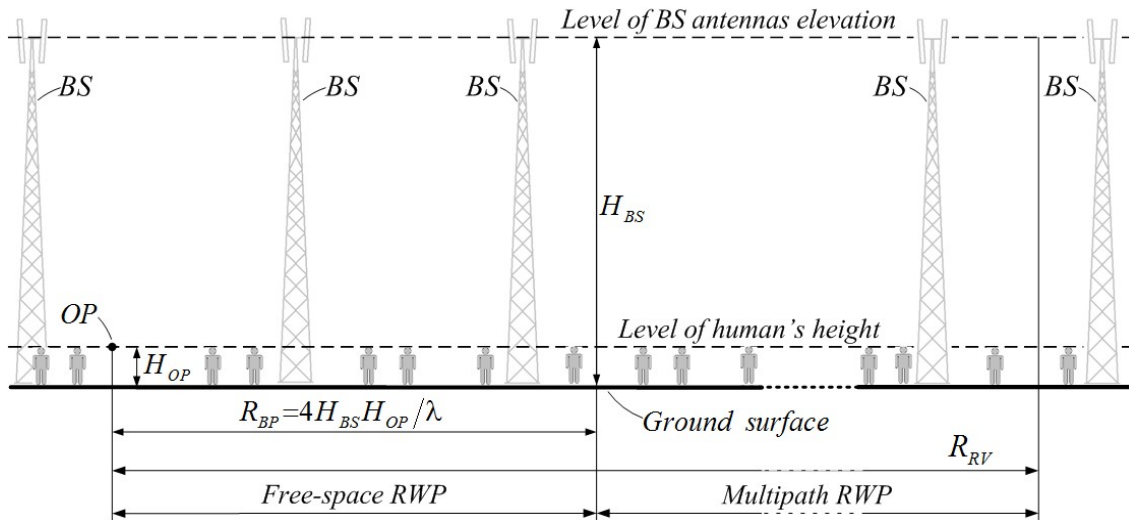
In cases when sources with the same EIRP  $P_e$  [W] of non-directional EM radiation are distributed over the area uniformly with average density  $\rho$ , the average SEMLA created by these sources, will be  $B = \rho P_e$ . The latter, in particular, can be used when evaluating the SEMLA created by MS, and also by BS in CC networks of a regular cellular structure.

Estimates (2) significantly depend on the wavelength  $\lambda$ . Taking into account the relative narrowness of the frequency bands allocated for EM radiation of BS of CC (the ratio of the width of the allocated frequency band to the value of its left border is 2.7 % for GSM-900, 4.2 % for GSM-1800, 2.8 % for UMTS, less than 5 % for each of the LTE frequency bands [15]), these estimates using (2) for each frequency band, can be performed for a fixed value of  $\lambda$  corresponding

to its middle. As a result, the total average intensity  $Z_{\Sigma BS}$  of EM background generated by the set of BS of all  $J$  frequency bands allocated for the BS EM radiation, can be determined in an obvious way:

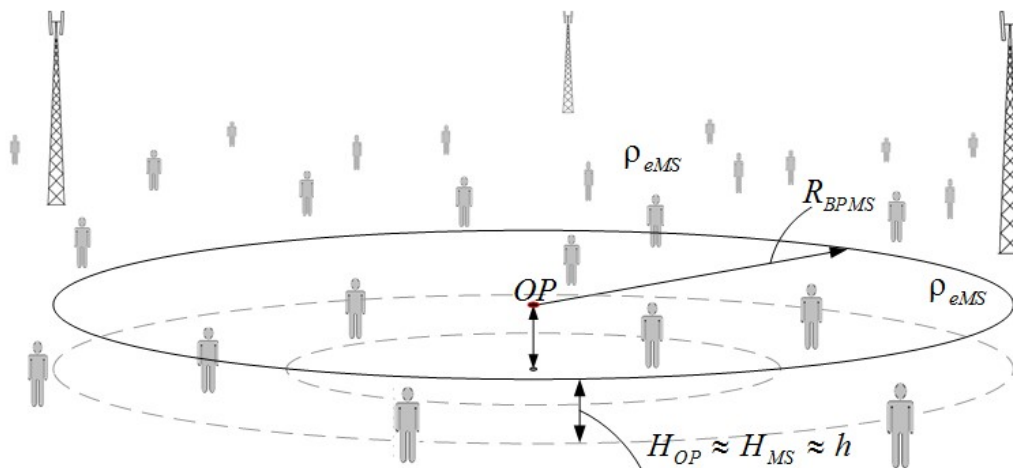
$$Z_{\Sigma BS} = \sum_{j=1}^J Z_{\Sigma BSj} = \sum_{j=1}^J \frac{B_{BSj}}{2} \ln \left( \frac{4H_{OP} \sqrt{e}}{\lambda_j} \right), \quad H_{OP} \geq \max \left\{ \frac{\lambda_1}{4}, \frac{\lambda_2}{4}, \dots, \frac{\lambda_J}{4} \right\}, \quad (5)$$

where  $Z_{\Sigma BSj}$  is the total average EM background intensity, created in OP at a height  $H_{OP}$  above the Earth's surface by the set of BS radiating in the relatively narrow  $j$ -th frequency band, for which the wavelength of BS radiation is taken equal to  $\lambda_j$ .



**Fig. 1.** Mutual terrestrial distribution of observation point (OP) and BS. Height of BS antennas above the surface  $H_{BS} \geq 10$  m is significantly higher than the height  $H_{OP} = 1 \dots 2$  m of the OP above the Earth's surface. Boundary between regions of free and of interference RWP corresponds to the radius of the OP "breakpoint" vicinity  $R_{BP} = 4H_{BS}H_{OP}/\lambda$

**Рис. 1.** Взаимное территориальное размещение точки наблюдения (OP) и базовых станций (BS). Высота антенн BS над поверхностью  $H_{BS} \geq 10$  м значительно превышает высоту  $H_{OP} = 1 \dots 2$  м OP над земной поверхностью. Граница между областями свободного и интерференционного распространения радиоволн (RWP) соответствует радиусу «брейкпойнт»-окрестности OP  $R_{BP} = 4H_{BS}H_{OP}/\lambda$



**Fig. 2.** Mutual terrestrial distribution of OP and subscribers with radiating MS. Elevation  $H_{MS}$  of MS and elevation of OP  $H_{OP}$  above the Earth's surface is assumed to be equal roughly:  $H_{OP} \approx H_{MS} \approx h$ . In this figure  $R_{BPMS} = 4h^2/\lambda$  is the radius of region of free-space RWP between MS and OP

**Рис. 2.** Взаимное территориальное размещение OP и пользователей с излучающими мобильными станциями (MS). Высоты MS  $H_{MS}$  и OP  $H_{OP}$  над земной поверхностью приняты примерно одинаковыми:  $H_{OP} \approx H_{MS} \approx h$ . На этом рисунке  $R_{BPMS} = 4h^2/\lambda$  – радиус области свободного RWP между MS и OP



*EM background Intensity created by MS of CC*

The average total intensity of EM background  $Z_{\Sigma MS}$  [W/m<sup>2</sup>] created in OP by a set of radiating MS located at a height  $H_{MS} \approx H_{OP} \approx h$  above the Earth's surface randomly uniformly in area of MS radio visibility from the OP, is determined by the following expression [45, 48]:

$$Z_{\Sigma MS} = Z_{\Sigma MS1} + Z_{\Sigma MS2} \approx B_{MS} \ln\left(\frac{6.44 \cdot h}{\lambda}\right), \quad h \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}, \quad (6)$$

$$Z_{\Sigma MS1} = \frac{B_{MS}}{2} \ln\left(\frac{8\pi h^2}{\lambda^2}\right), \quad Z_{\Sigma MS2} = \frac{B_{MS}}{4}, \quad (7)$$

where  $\lambda$  is the wavelength of MS radiation,  $B_{MS}$  [W/m<sup>2</sup>] is the average SEMLA created by radiating MS in the area of MS radio visibility (at least, in the OP vicinity). In (6), (7) the presence of a MS reactive near-field zone (absence of radiation at distances  $R \leq \lambda/2\pi$ ) was taken into account.

The average SEMLA  $B_{MS}$  created by MS is defined by the average terrestrial density  $\rho_{eMS}$  [devices/m<sup>2</sup>] of radiating MS in the considered area, and by the average EIRP  $P_{eMS}$  [W] of these MS:  $B_{MS} = \rho_{eMS} P_{eMS}$ . The  $\rho_{eMS}$  value is determined by the total area density of MS (radiating and non-radiating)  $\rho_{MS}$  and by the specific traffic intensity  $G_{MS}$  [Erl] (the probability of the MS being in the radiation mode):  $\rho_{eMS} = \rho_{MS} G_{MS}$ . For CC phones,  $G_{MS} = 0.08-0.1$  Erl can be reached during business-hours [14, 10, 54]. The  $P_{eMS}$  value can be taken equal to 30–50 % of the maximum power  $P_{MSmax}$  of MS radiation [43, 55]. Depending on the CC standard and MS type  $P_{MSmax} = 0.1 \dots 0.25$  W; EM radiation of MS is considered to be isotropic with an antenna gain of 1.

The average EM background intensity (6) created by MS also consists of two components: the frequency dependent component  $Z_{\Sigma MS1}$  corresponds to the contribution of MS located in OP vicinity of free-space RWP between MS and OP, and the frequency independent component  $Z_{\Sigma MS2}$  corresponds to the contribution of MS located outside this vicinity in the area of interference RWP.

As for EM background created by BS, estimates (6) also depend on the wavelength  $\lambda$ . Therefore, taking into account that frequency bandwidths of the BS and MS radiation are usually the same, to determine the total average EM background intensity  $Z_{\Sigma \Sigma MS}$  created by radiations of MS of all  $J$  CC frequency bands, an obvious procedure similar to (5) can be proposed:

$$Z_{\Sigma \Sigma MS} = \sum_{j=1}^J Z_{\Sigma MSj} = \sum_{j=1}^J B_{MSj} \ln\left(\frac{6.44 \cdot h}{\lambda_j}\right), \quad h \geq \max\left\{\frac{\lambda_1}{5}, \frac{\lambda_2}{5}, \dots, \frac{\lambda_J}{5}\right\}, \quad (8)$$

where  $Z_{\Sigma MSj}$  is the total average EM background intensity, created in OP at a height  $h$  above the Earth's surface by the set of randomly distributed MS radiating in the relatively narrow  $j$ -th frequency band, for which the wavelength of MS radiation is taken equal to  $\lambda_j$ .

Ideally, if we neglect the presence of a MS near-field reactive zone where the MS EM radiation is absent, then the frequency dependence of levels of MS fields in OP can also be neglected. In this case the level  $Z_{MSp}$  of EM background in OP caused by MS radiations, which is not exceeded with probability  $p$ , is determined by the level of prevailing EM field of the nearest MS, which is also related to the average SEMLA  $B_{MS}$  created by MS set in the OP vicinity [41–43]:

$$Z_{MSp} \approx \frac{B_{MS}}{4(1-p)}, \quad B_{MS} \approx \rho_{eMS} P_{eMS}; \quad p > 0.9. \quad (9)$$

For UHF CC systems (0.3–3 GHz), the level of EM background created by MS radiations, not exceeded with probability  $p \approx 0.99$ , is approximately equal to  $Z_{p \approx 0.99} \approx 25B_{MS}$  [48].

Comparative estimates using (2) and (6), allow us to conclude that at uniform MS terrestrial distribution, the contribution of their EM fields to the total background intensity created by CC is less by an order of magnitude or more than the contribution of BS EM fields, due to the significantly different EIRP of BS and MS at the radio link between them. However, in places of mass gathering of MS, where their area density can exceed the average density a hundred times or more (shopping and business centers, stadiums, airports, etc.), contribution of MS radiations to the total EM background intensity created by CC, turns out to be dominating.

### SEMLA Estimation in 4G/5G/6G Networks

Due to the extremely intensive increase in the quantity and spatial density of sources of EM radiations, as well as the significant expansion of wireless information services at CC evolution to 5G/6G, direct SEMLA calculation based on (4) to predict total average background intensity using (2), (5), is rather difficult due to a significant complication of CC radio network infrastructure. Alternatively, the technique [50, 51] of estimation of average SEMLA and average EM background intensity created by the set of CC BS, in terms of prediction of the average ATC, can be proposed.

The average total ATC  $S_{tr}$  [bit/s/m<sup>2</sup>] of CC wireless information services (one of the key 4G/5G/6G system parameters, presented in Table 1) is defined as the volume of downlink traffic over the set  $M$  of BS radio frequency channels (RFC) per unit area:

$$S_{tr} = \frac{\sum_{m=1}^M V_{tr RFC m}}{S}, \quad M = \sum_{l=1}^L k_l, \quad (10)$$

where  $S$  is the area, the wireless information services of which are provided by the total set of  $M$  downlink RFC of all of  $L$  BS located in area  $S$ ;  $V_{tr RFC m}$  [bit/s] is the traffic volume of the  $m$ -th servicing downlink RFC (can be equal to its capacity or data rate).

The proposed technique is based on the following relations obtained on the basis of the well-known Shannon-Hartley theorem under the assumption that properties of the intranet interference in RFC are close to the properties of their internal thermal noise:

$$B_{\Sigma BS} = \frac{8\pi^2 mkT_0 K_N D_{\Sigma} (2^{W_{EP}} - 1) R_{\max}^2 S_{tr} Q}{\lambda^2 W_{EP}} = \frac{8\pi^2 mkT_0 K_N D_{\Sigma} CNIR \cdot R_{\max}^2 S_{tr} Q}{\lambda^2 \log_2(1 + CNIR)}, \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{PR} &\approx \Delta F_R \cdot \log_2(1 + CNIR), \quad CNIR = P_R / N_{\Sigma} \\ W_{EP} &= C_{PR} / \Delta F_R = m W_{ER} \approx \log_2(1 + CNIR) \\ D_{\Sigma} &= (K_{CC} + 1) L_m L_C K_H \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

where  $C_{PR}$  [bit/s] is the potential RFC capacity;  $\Delta F_R$  is the RFC bandwidth, [Hz];  $P_R$  is the RFC useful signal power, [W];  $N_{\Sigma}$  is the RFC total noise power which is a sum of RFC internal thermal noise power  $N_0$  and intrasystem interference power  $N_{INT}$ , [W];  $CNIR$  is the "carrier-to-(noise plus intrasystem interference)" ratio;  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  W/K is Boltzmann's constant,  $K_N$  is radio receiver noise factor,  $T_0$  is an ambient temperature ( $T_0=290$ K);  $W_{EP}$  [bit/s/Hz] is the RFC potential spectral efficiency which is  $m$  times greater than the real RFC spectral efficiency  $W_{ER}$ ;  $D_{\Sigma}$  is a total necessary reserve in BS radiating power which take into account the losses  $L_m$  at RWP into buildings ( $L_m \leq 100$  [56–58]), the losses  $L_C$  at RWP in street canyons (which are caused by multipath phenomenon due to the reflection from buildings and Earth's surface, and also by diffraction;  $L_C \leq 100$  [53]), the necessary margin  $K_H$  in levels of receiving signals for the handover implementation ( $K_H \leq 10$ ), and the factor  $K_{CC} = N_{INT}/N_0$  which characterizes the excess of the internal thermal noise level by the intrasystem interference level.  $K_{CC}$  value is determined by the quality of the frequency-spatial planning (FSP) of CC radio network and can take values in a wide range from 0 (without intrasystem interference) to 100...1000 (20–30 dB) and even more at low FSP quality (at poor intrasystem electromagnetic compatibility (EMC));  $R_{\max}$  is a radius of service area (cell radius of CC network), on the border of which the required level of useful signal on MS receiver's input needs the maximum BS radiated power;  $Q$  characterizes the average level of spatial selectivity of BS EM radiation of data bits in the direction of the Earth's surface; it is taken into account above when considering the expression (4).

Total necessary reserve  $D_{\Sigma}$  in transmitting power is different for BS of different hierarchical levels of CC radio network structure: for internal pico-BS (access points in rooms, hotspots, etc.)  $D_{\Sigma} \leq 10$ –30 dB, for external micro- and macro-BS with  $R_{\max} \geq 200$  m in dense urban areas [13] it can reach 70–80 dB in radio networks with poor intrasystem EMC (at high  $K_{CC}$  levels). Thus, under the requirements for RFC data rates of 4G/5G/6G CC (Table 1), it is the value of the parameter  $D_{\Sigma}$  that actually determines the total average SEMLA (11) and the total background intensity (2), (5) created by BS of CC. In some cases, when determining the  $D_{\Sigma}$  value, it is advisable to take into account some correlation between its components in (12).

Factor  $m$  in (11), (12) reflects both the ratio of potential and real RFC spectral efficiency, and the contribution of MIMO technology in its improvement. In cellular RFC without the use of MIMO technology  $m \approx 2 \dots 10$ . Thus, the expected increase in CC RFC spectral efficiency due to MIMO technology by 2–8 times [15] actually allows one only to compensate approximately for the imperfectness of real modulation/demodulation and coding-decoding processes. Therefore, in today's practice, predictable analysis of EM background in 4G/5G networks can be performed for  $m = 1$  under the assumption that CC RFC capacity is close to the potential (use  $m \approx 1$ ).

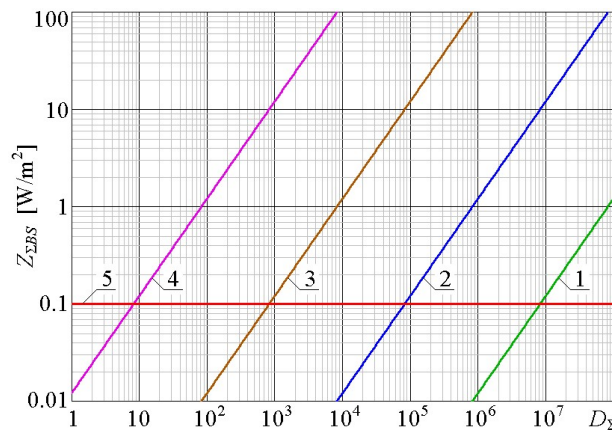
### How to make 4G/5G/6G safe for people?

To illustrate the possibilities of using the proposed technique for the analysis of EM background generated by CC, the calculated dependences  $Z_{\Sigma BS}(D_{\Sigma})$  of the average intensity of EM background created by BS of CC urban micro-cells ( $R_{\max} = 200$  m) in the 2 GHz band ( $\lambda = 0.15$  m) near the Earth's surface at a height of  $H_{OP} = 1.5$  m, on the level of total necessary reserve  $D_{\Sigma}$  in BS radiating power, are given in Fig. 3.

These dependencies are obtained using expressions (2), (11) for various ATC levels created by CC networks: curve No. 1 is obtained for  $S_{tr} = 10^3$  bit/s/m<sup>2</sup>, which corresponds to the estimated ATC in 2G/3G networks; curve No. 2 is calculated for  $S_{tr} = 10^5$  bit/s/m<sup>2</sup>, which corresponds to the declared ATC level in 4G networks [13, 16], curve No. 3 is calculated for  $S_{tr} = 10^7$  bit/s/m<sup>2</sup> which corresponds to the declared maximum ATC level in 5G networks [16, 17], the curve No. 4 corresponds to the predicted ATC limit  $S_{tr} = 10^9$  bit/s/m<sup>2</sup> in 6G networks [19, 20]; the red horizontal line corresponds to MPL 0.1 W/m<sup>2</sup>, accepted in many countries, taking into account the danger of non-thermal effects of radio frequency EM fields on the human body.

Curve 1 in Figure 3 is in full agreement with measurement results [1–11]: at the ATC levels created by 2G/3G networks, the average level of EM Background is below 0.1 W/m<sup>2</sup> at network energy reserve  $D_{\Sigma} \leq 10^7$  (70 dB), which is more than enough to compensate for all RWP losses in urban area and for presence of intrasystem interference due to the limited radio frequency resource used in CC radio network.

Dependence 2 allows us to conclude that the average ATC level expected in 4G networks requires the CC operation with an energy reserve of  $D_{\Sigma} \leq 10^5$  (50 dB). This can be reached at the high FSP quality and the widespread use of indoor hotspots, urban micro-cells to reduce RWP losses in urban areas.



**Fig. 3.** The calculated dependences of the average EMB intensity created by CC urban micro-cells of UHF frequency range ( $\lambda = 0.15$  m) near the Earth's surface at a height of  $H_{OP} = 1.5$  m, on the total necessary reserve  $D_{\Sigma}$  in BS EMR power to compensate for RWP losses in street canyons and buildings, for handover implementation and for overcoming intra-network interference, at different levels of CC area traffic capacity (ATC)

**Рис. 3.** Расчетные зависимости средней интенсивности ЭМ фона, создаваемого городскими микро-сайтами в диапазоне УВЧ ( $\lambda = 0.15$  м) вблизи земной поверхности на высоте  $H_{OP} = 1.5$  м, от суммарного запаса  $D_{\Sigma}$  по мощности ЭМ излучения BS, необходимого для компенсации затухания радиоволн в городских «каньонах», при их проникновении в здания, для реализации хэндовера и для преодоления внутрисетевых помех, при различной территориальной плотности беспроводного трафика (АТС)

As for the total ATC levels predicted for 5G/6G radio networks, these levels of wireless information services in all areas of human activities can only be safe at CC networks energy reserves  $D_{\Sigma} \leq 10^3$  in 5G systems and  $D_{\Sigma} \leq 10$  in 6G systems (which requires a significant reduction in the radio communication range up to a few tens of meters or less, exclusion of the effect of any obstacles on urban RWP and also exclusion or reduction to the minimum level of intra-network interference, as well as introduction of the necessary restrictions on the volume and options of wireless public information services and various technological information processes).

Thus, the use of (2) – (11) provides the possibility of a proximate system analysis and forecast of environmental EM pollution by both operating and designed CC networks, as well as the possibility of quantitative substantiation of the requirements for possible options for ensuring their safety and environmental friendliness.

The SEMLA value in definition (4) is an integral parameter characterizing the specific average EM loading on area created by terrestrially distributed radio transmitters. Therefore, expressions (2), (3), (5) – (9) can also be used to analyze the intensity of EM background created by any other radio systems and radio services – broadcasting, fixed, navigation, etc.

In definition (11), the SEMLA value is directly and unambiguously related to the general system parameters of 4G/5G/6G networks presented in Table 1, in particular,

- with ATC (10), which defines the integral level of wireless information services and is used in (11);

- with “Connectivity density” (density  $\rho_{eMS}$  of radiating MS), which determines the average SEMLA value created by EM radiations of MS used in (6) – (9);  $\rho_{eMS}$  definition also provides the possibility of indirect estimation of ATC for subsequent use of model (11) to estimate the background level created by BS radiations;

- with “RFC spectrum efficiency” and  $CNIR$  which are used in (11), (12) and determine the CC network energy efficiency;

- with RFC “Peak data rate” and “Experienced data rate” associated with ATC and along with cell’s radius  $R_{max}$  determining the average SEMLA created by BS [50, 59], as well as

- with wavelength  $\lambda$  describing the radio frequency resource used by the CC system.

The planned widespread use of quasi-optical and optical (terahertz and laser) technologies and subsystems for ultra-fast wireless data transmission (up to 1 Tbps) at various infrastructure levels of the 5G/6G networks, as well as at the implementation of various technological information processes in industry, transportation, education and other areas, provides a significant reduction in radio-frequency ATC (10), and a corresponding decrease in radio-frequency SEMLA and in the intensity of radio-frequency EM background created by CC.

The planned increasingly widespread use of adaptive active phased-array antennas as the BS antenna systems of an adaptive multibeam operation with adaptability of directivity and power of BS radiation for each of serving MS will also reduce SEMLA levels (4), (11) and the EM background created by these systems by reducing the parameter  $Q$  of BS radiation directivity, at least, by an order of magnitude.

The influence of the planned widespread use of MIMO technology on the intensity of EM background created by 4G/5G/6G networks, is also taken into account by the presence in (11), (12) of the WEP and  $m$  parameters that determine the real spectral efficiency of RFC of CC.

Finally, a very significant expansion of the radio-frequency spectrum allocated to these networks, including allocation of numerous frequency bands in SHF and EHF ranges, which greatly simplify the solving of intra-network EMC problem and increase the spatial selectivity of BS EM radiation with a significant (by 1–2 orders of magnitude or more) decrease in the level of intra-network interference and an increase in the real sensitivity of radio reception means the corresponding increase in 4G/5G/6G network energy efficiency, and is also taken into account by the presence of parameters  $\lambda$ ,  $K_{CC}$  and  $Q$  in expressions (2), (11) and (12).

Since the analysis of all referred CC parameters and characteristics can be performed without the use of confidential commercial information of CC operator companies, the use of this technique can provide a high degree of independence and objectivity of estimations of EM background intensity created by CC systems. Its application to estimate the expected levels of EM background at various implementation alternatives and different structure and volumes of wireless information services can

provide a justification and assessment of the effectiveness of system, technical and managerial solutions aimed at ensuring the required levels of safety and environmental friendliness of 4G/5G/6G systems in various conditions.

### Conclusion

1. The validity of the hypothesis about the possible impact of the EM background created by the public wireless information systems, first of all by systems of cellular (mobile) communications, on the relative lethality rate from COVID-19 is indirectly confirmed by the results of the analysis of correlation between the degree of severity of hygienic regulation of levels of radio frequency EM background for the population in different countries according to data [12] and the lethality rate from COVID-19 in relation to the number of people infected according to [38–40].

Taking into account the extremely high cost of error in this conclusion, this hypothesis certainly requires further verification, both in terms of analyzing the reliability of data [38–40, etc.], which are the basis of the correlation analysis, and in analyzing the actual levels of EM background in places with different levels of the lethality rate from COVID-19, and in terms of accounting for the impact on the lethality rate from COVID-19 of other factors (the effectiveness of national health systems, the effectiveness of government measures against the spread of COVID-19, etc.).

2. Detected correlation between the degree of severity of hygienic regulation of levels of radio frequency EM background for the population and the lethality rate from COVID-19 in various countries requires a critical attitude to corporate declarations [24, etc.] about the harmlessness of 4G/5G/6G technologies and systems for the population, as well as possibly revising plans [15–20] for the development of these technologies and systems towards a wider, if possible, use of non-radiating wire (fiber-optic, cable, etc.) technologies and systems without any damage to the quality of public information services and to the technological level in industry, services, education, healthcare and in other sectors.

3. The calculated data contained in [41–51], as well as preliminary quantitative estimates using (2), (3), (5) – (9), (11), (12), indicate that the fulfillment of severe hygiene restrictions on the MPL of EM background 1–10  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , which take into account the danger of non-thermal effects of radio frequency EM fields on public health, in 4G/5G/6G networks, and the safe development of these networks to the levels indicated in Table 1, are quite possible under the following conditions:

a) reducing the distances of high-speed wireless data transmission up to a few tens of meters or less in conditions of direct visibility and lack of multipath RWP [50, 51] so that the achieved SEMLA level created by CC BS in UHF bands will be no more than half of the accepted MPL value [44];

b) using the external micro- and macro-BS of CC substantially for mobile telephony and technological low data rate services, including such wireless servicing of mobile objects, with a restriction to safe levels of data transfer rates over the RFC of these BS;

c) fast developing of 4G/5G/6G technologies and systems towards the implementation of system and technical solutions related to increasing spectral and network energy efficiency and ensuring decrease in EM background levels created by 4G/5G/6G radio networks, ensuring in them the maximum possible level of adaptation of power and directivity of EM radiation, optimization of the volume of wireless information services;

d) following the example of [21–23], introduction of reasonable restrictions on the use of wireless services in places requiring special attention – in places where children stay (kindergartens, schools, etc.), in hospitals, in vehicles, etc., providing the necessary level of public EM safety.

## References

1. Ozdemir A.R., Alkan M., Gulsen M. Time Dependence of Environmental Electric Field Measurements and Analysis of Cellular Base Stations. *IEEE EMC Magazine*. 2014;3:43-48.
2. Burgi A., Theis G., Siegenthaler A., Roosli M. Exposure modeling of high-frequency electromagnetic fields. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2008;18:183-191.
3. Gajsek P., Ravazzani P., Wiart J., Grellier J., Samaras T., Thuroczy G. Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10MHz–6GHz). *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2015;25:37-44.
4. Ibrani M., Hamiti E., Ahma L., Halili R., Dragusha B. Comparative Analysis of Downlink Signal Levels Emitted by GSM 900, GSM 1800, UMTS, and LTE Base Stations. *16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, Budva, Montenegro, June 28-30, 2017: 5.
5. Joseph W., Verloock L., Goeminne F., Vermeeren G., Martens L. Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments. *Health Physics*. 2012;102(2):161-172.
6. Rowley J.T., Joyner K.H. Comparative international analysis of radiofrequency exposure surveys of mobile communication radio base stations. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2012;22:304-315.
7. Gotsis A., Papanikolaou N., Komnakos D., Yalofas A., P.Constantinou. Non-ionizing electromagnetic radiation monitoring in Greece. *Ann. Telecommun*. 2008;63:109-123.
8. Troisi F., Boumis M., Grazioso P. The Italian national electromagnetic field monitoring network. *Ann. Telecommun*. 2008;63:97-108.
9. Tomitsch J., Dechant E. and Frank W. Survey of Electromagnetic Field Exposure in Bedrooms of Residences in Lower Austria. *Bioelectromagnetics*. 2010;31:200-208. <http://www.interscience.wiley.com>.
10. Rufo M., Paniagua J., Jimenez A., Antolín A. Exposure to high-frequency electromagnetic fields (100 KHZ–2 GHZ) in Extremadura (Spain). *Health Physics Society*. 2011. <http://www.health-physics.com>.
11. Karpowicz J., Miguel-Bilbao S., Ramos V., Falcone F., Gryz K., Leszko W., Zradziński P. The evaluation of Stationary and Mobile Components of Radiofrequency Electromagnetic Exposure in the Public Accessible Environment. *Proc. of the Intern. Symp. on EMC "EMC Europe 2017"*, Angers, France, Sept. 4-8, 2017: 4.
12. Grigoriev O.A. Actual Issues of Radiobiology and Hygiene of Non-Ionizing Radiation in Connection With the Development of New Technologies. *Proc. of the scientific conf. "Actual Issues of Radiobiology and Hygiene for Non-Ionizing Radiations"*, Moscow, Russia, Nov. 12-13, 2019: 3. [http://www.bioemf.ru/conf/conf2/GRIGORIEV\\_OLEG.pdf](http://www.bioemf.ru/conf/conf2/GRIGORIEV_OLEG.pdf) (on-line resource, in Russ.).
13. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. Report ITU-R M.2135-1; 2009: 12.
14. Ericsson Mobility Report. Nov. 2019. <https://www.ericsson.com/en/mobility-report> (on-line resource).
15. LTE-Advanced (3GPP Rel.12). Technology Introduction. White Paper, 2015. [https://www.1ma252\\_wp\\_lte\\_rel12\\_2e.pdf](https://www.1ma252_wp_lte_rel12_2e.pdf), [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com) (on-line resource).
16. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Rec. ITU-R M.2083, 2015.
17. Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile GSMA Intelligence. Dec. 2014. <https://www.gsmainelligence.com> (on-line resource).
18. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Edited by J. Rodriguez. John Wiley & Sons; 2015: 293.
19. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K. and Fan P. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 2019;14(3):28-41.
20. Strinati E.C., Barbarossa S., Josiñ Luis Gonzalez-Jimenez J.L., Ktenas D., Cassiau N., Maret L., Dehos C. 6G: the Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication. *IEEE VT Magazine*. 2019;14(3):42-50.
21. Confédération suisse. Initiative populaire fédérale "Pour une téléphonie mobile respectueuse de la santé et économe en énergie". <https://www.admin.ch/opc/fr/federal-gazette/2019/6525.pdf>.
22. Effets sanitaires éventuels liés aux valeurs élevées de débit d'absorption spécifique de téléphones mobiles portés près du corps. Anses Rapport d'expertise collective. Téléphones mobiles portés près du corps et santé. Édition scientifique. Juillet 2019: 128.
23. Le Gouvernement agit pour limiter l'exposition aux émissions de certains téléphones mobiles et mieux informer le public. Communiqué de Presse Paris, le 25 Octobre. [https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/191025-\\_cp\\_anses.pdf](https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/191025-_cp_anses.pdf).
24. ICNIRP RF EMF Guidelines 2020. March 2020. [www.icnirp.org/en/activities/news/news-article/rf-guidelines-2020-published.html](http://www.icnirp.org/en/activities/news/news-article/rf-guidelines-2020-published.html) (on-line resource).
25. Grigoriev O., Goshin M., Prokofyeva A., Alekseeva V. [Features of national policy in approaches to electromagnetic field safety of radio frequencies radiation in different countries]. *Gigiena i Sanitaria = Gigiena i Sanitaria*. 2019;98(11) (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11>.

26. Belpomme D., Hardell L., Belyaev I., Burgio E., Carpenter D.O. Thermal and nonthermal health effects of low intensity non-ionizing radiation: An international perspective. *Environ Pollut.* 2018;242(Pt A):643-658.
27. Volkow N.D., Tomasi D., Wang G.F., Vaska P., Fowler J.S., Teland F. Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism. *J Am Med Assoc.* 2011;305(8):808-814.
28. Johansen C., Boice Jr., McLaughlin J., Olsen J. Cellular telephones and cancer – a nationwide cohort study in Denmark. *J Natl Cancer Inst.* 2001;93:203-207.
29. Divan H.A., Kheifets L., Obel C., Olsen J. Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. *Epidemiology.* 2008;19:523-529.
30. Lukyanova S.N. [*Microwave Electromagnetic field of non-thermal intensity as an irritant for the central nervous system*]. Moscow, Russia: SRC – FMBC; 2015. (in Russ.)
31. Agarwal A., Desai N.R., Makker K., Varghese A., Mouradi R., Sabanegh E. Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study. *Fertil Steril.* 2009;92:1318-1325.
32. Avendaño C., Mata A., Sanchez Sarmiento C.A., Doncel G.F. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril.* 2012;97(1):39-45.e2. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2011.10.012. Epub 2011 Nov 23. PMID: 22112647.
33. Havas M. Radiation from wireless technology affects the blood, the heart, and the autonomic nervous system. *Rev Environ Health.* 2013;28:75-84.
34. Saili L., Hanini A., Smirani C., Azzouz I., Azzouz A., Sakly M. Effects of acute exposure to WiFi signals (2.45 GHz) on heart variability and blood pressure in albino rabbits. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2015;40:600-605.
35. Grigoriev Y.G., Grigoriev O.A., Ivanov A.A., Lyaginskaya A.M., Merkulov A.V., Stepanov V.S. [Autoimmune process after long-term low-level exposure to electromagnetic field (experimental results). P. 1. Mobile communications and changes in electromagnetic conditions for the population: need for additional substantiation of existing hygienic standards]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2010;50(1):5-11. (in Russ.)
36. Sannino A., Zeni O., Romeo S., Massa R., Gialanella G., Grossi G. Adaptive response in human blood lymphocytes exposed to non-ionizing radiofrequency fields: resistance to ionizing radiation-induced damage. *J Radiat Res.* 2014;55:210-217.
37. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. WHO, Press Release; 2011: 208.
38. WHO COVID-19 Situation Report – 105 for May 04. Johns Hopkins Center for Health Security (on-line resource).
39. WHO COVID-19 Situation Report – 112 for May 11. Johns Hopkins Center for Health Security (on-line resource).
40. WHO COVID-19 Situation Report – 119 for May 18. Johns Hopkins Center for Health Security (on-line resource).
41. Mordachev V. Mathematical Models for Radiosignals Dynamic Range Prediction in Space-Scattered Mobile Radiocommunication Networks. *The IEEE Semi Annual VTC Fall 2000*, Boston, Sept. 24-28, 2000.
42. Mordachev V., Loyka S. On Node Density – Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.* 2009;27(7):1120-1131.
43. Mordachev V. [*System ecology of cellular communications*]. Belarus State University Publishers; 2009: 319. (in Russ.)
44. Mordachev V. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations. *Proc. of the 9th Int. Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Cagliari, Sardinia, Italy, July 1-5, 2013: 590-595.
45. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Created by Cellular Mobile Stations Near Ground Surface. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2014"*, Gothenburg, Sweden, Sept. 1-4, 2014: 1275-1280.
46. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Near Ground Surface Created by Heterogeneous Radioelectronic Environment. *Proc. of the EMC Joint IEEE Int. Symp. on Electrom. Compat. and "EMC Europe"*, Dresden, Germany, Aug. 16-22, 2015: 1147-1152.
47. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2016"*, Wroclaw, Poland, Sept. 5-9, 2016: 590-595.
48. Mordachev V. System-Level Estimation of Prevailing Levels of EM Fields of Mobile Phones Considering Near-Field Zone Limitations of Their Antennas. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2017"*, Angers, France, Sept. 4-8, 2017: 6. (paper No.64).
49. Mordachev V. [Verification of the worst case model for the estimation of average intensity of the electromagnetic background created by base stations of cellular communications]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2018;1(111):12-18. (in Russ.)

50. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2018"*, Amsterdam, The Netherlands, Aug.27-30, 2018: 202-207.
51. Mordachev V. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2019"*, Barcelona, Spain, Sept. 2-6, 2019: 82-87.
52. Mordachev V. Verification of Worst-Case Analytical Model for Estimation of Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications, *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2020"*, Rome, Italy, Sept. 7-11, 2020: 6 p. (accepted).
53. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Rec. ITU-R P.1411-8.
54. Louail, Lenormand M., Cantu Ros O.G., Picornell M., Herranz R., Frias-Martinez E., Ramasco J.J., Barthelemy M.. From mobile phone data to the spatial structure of cities. *Scientific Reports*. 4: 5276. DOI: 10.1038/srep05276/ www.nature.com/scientificreports (on-line resource).
55. Kelsh M.A., Shum M., F, Sheppard A.R., Mcneely M., Kuster N., Lau E., Weidling R, Fordyce T., Kuhn S. and Sulser C. Measured radiofrequency exposure during various mobile-phone use scenarios. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2011;21:343–354.
56. Propagation statistics required for broadcasting services using the frequency range 30 to 1000 MHz. Report ITU-R 239-7; 1990: 304.
57. Radio-Paging Systems. Report ITU-R 499-5; 1990: 59.
58. A.F. de Toledo, A.M.D.Turkmani, Propagation into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz. *Proc. Of IEEE Vehicle Technology Conf.*, 1992: 633-636.
59. Mordachev V.I. [Frequency-independent limits of values of system parameters of cellular communications at multipath propagation of radio waves in urban area]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;7-8(126):117-124. (in Russ.)

#### Сведения об авторах

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Information about the authors

Mordachev V.I., PhD, Associate Professor, Leading Researcher of the R&D laboratory «Electromagnetic compatibility of radioelectronic systems» of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-84-38;  
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by  
Мордачев Владимир Иванович

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-84-38;  
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by  
Mordachev Vladimir Ivanovich