

ИНФОРМАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2024

Том 7

№ 1

Журнал основан в 2018 г.
Выходит 4 раза в год

Почетный главный редактор

Гуляев Юрий Васильевич — научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, академик, член Президиума РАН (Москва, Россия)

Главный редактор

Вольвач Александр Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Крымской астрофизической обсерватории РАН (Крым, Россия)

Заместитель главного редактора

Ермолов Павел Петрович — кандидат технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Редакционная коллегия

Абрамов Игорь Иванович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика приборов микро- и нанoeлектроники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Афонин Игорь Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Белкин Михаил Евсеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий научно-технологической лабораторией и профессор МИРЭА — Российского технологического университета (Москва, Россия)

Бичурин Мирза Имамович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры Новгородского государственного университета (Великий Новгород, Россия)

Богатырёв Юрий Владимирович — доктор технических наук, главный научный сотрудник Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению (Минск, Беларусь)

Борисова Нина Александровна — доктор исторических наук, доцент, заместитель директора по науке и технике Центрального музея связи им. А. С. Попова, профессор кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург, Россия)

Громов Дмитрий Викторович — доктор технических наук, профессор отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ, главный научный сотрудник центра экстремальной прикладной электроники института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Москва, Россия)

Гудков Александр Григорьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

Запарий Владимир Васильевич — доктор исторических наук, профессор Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)

Запевалов Владимир Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией гиротронов для управляемого термоядерного синтеза Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород, Россия)

Иванов Вячеслав Элизбарович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Ipeev Dimov Stojce — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

Ипатов Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института прикладной астрономии РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Касьянов Александр Олегович — доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических и телекоммуникационных систем Инженерно-технологической академии Южного федерального университета (Таганрог, Россия)

Колосов Станислав Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Криворучко Юрий Тимофеевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (Санкт-Петербург, Россия)

Кураев Александр Александрович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Ларионов Михаил Григорьевич — доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева (Москва, Россия)

Малютин Николай Дмитриевич — доктор технических наук, профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, директор НИИ систем электрической связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия)

Носков Владислав Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Обухов Илья Андреевич — доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе НПП «Радиотехника» (Москва, Россия)

Овчинникова Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор кафедры 406 Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт (Москва, Россия)

Пестриков Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения (Санкт-Петербург, Россия)

Пестряков Александр Валентинович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиооборудование и схемотехника», руководитель научно-исследовательского отдела «Радиотехнические системы и устройства» Московского технического университета связи и информатики (Москва, Россия)

Совлуков Александр Сергеевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

Старостенко Владимир Викторович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского» (Симферополь, Россия)

Чаусов Денис Николаевич — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией фотоники и органической электроники Центра биофотоники Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Россия)

Широков Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронная техника» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

Богущ Вадим Анатольевич — доктор физико-математических наук, профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Евстигнеев Максим Павлович — доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной деятельности Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Nemai Chandra Karmakar — associate professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Новиков Владимир Витальевич — доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей Черноморского высшего военно-морского ордена Красной Звезды училища им. П. С. Нахимова» (Севастополь, Россия)

Содержание

Физические науки (1.3)

Ларионов М. Г. Физические свойства материи, связанной с понятием «темная энергия»	1
Коган Л. П., Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Бубукин И. Т., Штернберг В. Б. О различии свойств статистики измерений магнитного поля для географически разнесенных магнитометров перед землетрясением 6 февраля 2024 года в восточной части Турции	33

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Обухов И. А., Обухов И. И. Кремниевый релаксационный квантовый транзистор	45
Коротков К. С., Сердюков В. В., Большов А. В. Измерение параметров комплексных коэффициентов передачи устройств, содержащих преобразования частоты	56
Козуб М. С. Учет ЭМС при определении дальности ОВЧ радиосвязи в направлении судно — берег	67
Тотьменинов Е. М., Конев В. Ю., Выходцев П. В. Способ генерации периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны	81
Широков И. Б., Головин В. В., Редькина Е. А., Сердюк И. В., Овчаров П. П. Разработки в области подводной беспроводной оптической связи и с помощью малогабаритных магнитных антенн	93
Громоздин В. В., Бартош А. Е., Беликов Д. Н., Новикова Т. В. Анализ вибраторной модели патч-излучателя с целью смещения измерительного расстояния в промежуточную зону	106

История науки и техники (5.6.6)

Пестриков В. М. Специальные типы электронных ламп	117
Пузанков Л. А. Новые успехи крымских радиолюбителей в области радиосвязей с космосом	144

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2024

Vol. 7

No. 1

The journal was founded in 2018
Published 4 times a year

Honorary Chief Editor

Gulyaev Yuri Vasilievich – Scientific Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, academician, member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Editor-in-Chief

Volvach Alexander Evgenievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Research of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (Crimea, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

Yermolov Pavel Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Radioelectronic Systems and Technologies” of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Editorial Board

Abramov Igor Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Research Laboratory “Physics of Micro- and Nanoelectronics Devices” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Afonin Igor Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the “Radioelectronic Systems and Technologies” Department of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of the Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Belkin Mikhail Evseevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Scientific and Technological Laboratory and Professor of MIREA — Russian Technological University (Moscow, Russia)

Bychurin Mirza Imamovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Technology of Radio-Electronic Equipment of Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Bogatyryov Yuri Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Chief researcher of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (Minsk, Belarus)

Borisova Nina Aleksandrovna – Doctor of Historical Sciences, Associate Professor, Deputy director for science and technology of the Central Museum of Communications n. a. A. S. Popov, Professor of the department of information communication systems of the St. Petersburg University of Telecommunications n. a. Professor M. A. Bonch-Bruевич (St. Petersburg, Russia)

Gromov Dmitry Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the Office of Educational Programs, Chief Researcher of the Center for Extreme Applied Electronics Institute of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russia)

Gudkov Aleksandr Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Technology of Instrumentation” of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Zapariy Vladimir Vasilievich – Doctor of Historical Sciences, Professor of the Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Zapevalov Vladimir Evgenyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Gyrotrons for Controlled Thermonuclear Fusion at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Nizhny Novgorod, Russia)

Ivanov Vyacheslav Elizbarovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Ilcev Dimov Stojce — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

Ipatov Aleksandr Vasilievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Supervisor of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

Kasyanov Aleksandr Olegovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University (Taganrog, Russia)

Koloso Stanislav Vasilyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computing Methods and Programming of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Krivoruchko Yuri Timofeyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio-Electronic Systems of the St. Petersburg State University of Civil Aviation (St. Petersburg, Russia)

Kuraev Aleksandr Aleksandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Larionov Mikhail Grigoryevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Astrocosmic Center of the Physical Institute n. a. P. N. Lebedev (Moscow, Russia)

Malyutin Nikolai Dmitrievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Designing Components and Parts of Radioelectronic Equipment, Director of the Research Institute of Electrical Communication Systems at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russia)

Noskov Vladislav Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Obukhov Ilya Andreevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy General Director for Research, Radiotekhnika Co. (Moscow, Russia)

Ovchinnikova Elena Viktorovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department 406 of the National Research University “Moscow Aviation Institute” (Moscow, Russia)

Pestrikov Victor Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Audiovisual Systems and Technologies of St. Petersburg State Institute of Film and Television (St. Petersburg, Russia)

Pestryakov Alexander Valentinovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Equipment and Circuitry, Head of the Research Department of Radio Engineering Systems and Devices of Moscow Technical University of Communications and Informatics (Moscow, Russia)

Sovlukov Alexander Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Control Problems n. a. V. A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Starostenko Vladimir Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Radiophysics and Electronics of the Physico-Technical Institute of Crimean Federal University n. a. V. I. Vernadsky (Simferopol, Russia)

Chausov Denis Nikolaevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Photonics and Organic Electronics of the Biophotonics Center of the Institute of General Physics named after. A. M. Prokhorov Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Shirokov Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic Engineering of the Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

Bogush Vadim Anatolyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Evstigneev Maksim Pavlovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Nemai Chandra Karmakar – Associate Professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Novikov Vladimir Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Missile Weapons of Surface Ships of Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov (Sevastopol, Russia)

Address:

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
E-mail: icrt.mail@mail.ru
Website: <http://icrtjournal.com>

Contents

Physical sciences

M. G. Larionov , Physical Properties of the Matter Associated with the Concept “Dark Energy”	1
L. P. Kogan, A. E. Volvach, L. N. Volvach, I. T. Bubukin, and V. B. Shternberg , On the Difference in the Properties of Magnetic Field Measurement Statistics for Geographically Displaced Magnetometers before the Earthquake of February 6, 2024 in the Eastern Part of Turkey	33

Electronics, photonics, instrumentation and communications

I. A. Obukhov and I. I. Obukhov , Silicon Relaxation Quantum Transistor	45
K. S. Korotkov, V. V. Serdyukov, and A. V. Bol'shov , Measurement of Parameters of Complex Transmission Coefficients of Devices Containing Frequency Conversions	56
M. S. Kozub , Consideration of the EMC in Determining the Distance of VHF Radio-Communication Action in the Ship-to-Shore Direction	67
E. M. Totmeninov, V. Yu. Konev, and P. V. Vykhodtsev , The Method of Generation of a Periodic Sequence of Ultrashort Gigawatt Pulses with a Nanosecond Repetition Period in the Superradiance Mode of a Relativistic Backward Wave Oscillator	81
I. B. Shirokov, V. V. Golovin, Ye. A. Red'kina I. V. Serdyuk, and P. P. Ovcharov , Developments in the Field of Underwater Wireless Optical Communication and Using Small-Sized Magnetic Antennas	93
V. V. Gromozdin, A. E. Bartosh, D. N. Belikov, and T. V. Novikova , Analysis of the Vibrator Model of the Patch Emitter with the Aim of Shifting the Measuring Distance to the Intermediate Zone	106

History of science and technology

V. M. Pestrikov , Special Types of Vacuum Tubes	117
L. A. Puzankov , New Successes of Crimean Radio Amateurs in the Field of Radio Communications with Space	144

Physical Properties of the Matter Associated with the Concept “Dark Energy”

M. G. Larionov

*Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences
Moscow, 117997, Russian Federation
mgl-mikhail@yandex.ru*

Received: April 10, 2024

Peer-reviewed: April 15, 2024

Accepted: April 15, 2024

Abstract: The structure of our World is based on the hypothesis of the existence of “dark energy”, which is a virtually quantized state of physical vacuum (PV). The Universe is filled with about 10^{122} densely packed PV cells. Each cell represents a volume of “space-time”, including an electron-positron (e-p) and positron-electron (p-e) virtual pair with energy $\Delta E = (\hbar/2) \cdot c = 1.85 \cdot 10^{-45}$ erg. The physical parameters of the Universe are obtained through five microscopic and macroscopic constants: electron mass m_e , electron charge e , gravitational constant G , speed of light c and Planck constant $\hbar$. Macroscopic parameters of the Universe include the Hubble constant $H_0 \approx 2.5 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$, the radius of curvature of the Universe $R_0 \approx 1.2 \cdot 10^{28} \text{ cm}$, its electric charge $Q_{Un} \approx 10^{52} \text{ CGSE (e.s.u.)}$, average density of matter in the Universe $\rho_{Un} \approx 2.19 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$. The quantized lepton component of matter in the Universe – “dark energy” – serves as a medium for the propagation of electromagnetic radiation. Microscopic parameters of the Universe include the physical characteristics of PV cells: the mass of the PV cell $m_{PV} \approx 10^{-66} \text{ g}$, the time spent in the state of a virtual electron and positron $t_{PV} \approx 10^{-23} \text{ s}$, virtual charge $q_{vir} \approx 10^{-29} \text{ e.s.u.}$, residual virtual charge $q_{res} \approx 10^{-70} \text{ e.s.u.}$ The fundamental possibility of excluding “dark matter” from the composition of the matter of the Universe is considered. The data obtained were used to study the evolutionary characteristics of the Universe. An exact expression for the “Fundamental Dirac constant” is obtained.

Keywords: cosmology, “dark matter”, “dark energy”, evolution of the Universe.

For citation (IEEE): M. G. Larionov, “Physical Properties of the Matter Associated with the Concept ‘Dark Energy’”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–32, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2023.07.1.01.

1. Introduction

Any new concept that provides an answer to the question “How does the Universe work?” must explain the complex of existing observational data. If we talk about cosmological data, these include:

1. Observational confirmation of the existence of cosmic relict background radiation (Cosmic microwave background, CMB) with a temperature of 2.7 K.
2. Experimental data from the WMAP space programs and PLANCK on CMB fluctuations, measured with high accuracy.
3. Data of observations of distant supernovae, which were used as reference standard “candles” in the Universe.
4. The experimentally established fact of the existence of a large-scale structure of the Universe, beginning from large redshifts z .
5. Observational data on the peculiarities of the dynamic characteristics of galaxy clusters and structural formations inside galaxies that require the involvement of “dark matter”.
6. Measured value of the Hubble constant.
7. Data on the density of matter in the Universe.
8. Data on the metrics of the Universe.
9. The presence of baryon asymmetry in the Universe.

The list does not include an item related to gravitational lensing, for the reason that so far we have only observed cases of strong lensing, which causes a selection effect does not allow obtaining reliable statistical data for the entire distribution of the general sample.

These data form the basis of observational cosmology. Researchers still have no answers to some of these facts. The question is also, whether the existing interpretation of the Universe is the only one or whether there is an alternative in the interpretation of these listed provisions. The main difficulty is that the baryonic (more precisely, hadronic) part of the matter is only a few percent of the critical density ρ_{cr} and is actually test particles inside the main medium of the Universe, which is a difficult to observe form of matter. However, it determines the dynamics and evolutionary features of our world. Particle physics is the main cornerstone in understanding the structure of our Universe. The modern concept of the World should naturally combine the quantum microstructure and macrostructure of the Universe.

The article presents a new concept of the Universe, based on an understanding of the physical properties and parameters of the main component of matter – “dark energy”. All physical characteristics of the Universe were obtained through five world “constants”: electron mass m_e , electron charge e , speed of light c , gravitational constant G and Planck’s constant $\hbar$.

2. Historical reference

Einstein's attempt to create a unified field theory was associated with the geometric concept of the essence of matter. The underlying assumption was that matter is an excited state of dynamic geometry. This idea goes back to the pre-Planck era. Perhaps even Riemann in 1864 was not the first to argue that space at the microscopic level could be significantly curved. Clifford in his work said in more detail: "a particle is nothing more than a curved empty space, differing from the surrounding space in the magnitude of local curvature, and perhaps in topology" [1]. It should be especially noted that the concept of topology also includes the number of dimensions. Thus, already at that time the constancy of the number of dimensions of space at different scales was questioned.

Ideas related to the topological features of space, from the point of view of the concept of electric charge, belong to several remarkable scientists: Weil in the monograph [2], several decades later Wheeler [3] and him in collaboration with Misner [4]. Therefore, it is not surprising that Einstein used the concept of "gravity – curved space-time." Riemann created all the basic mathematics that Einstein used in his general theory of relativity. This applied to both the metric tensor and the curvature tensor. His friend Grossman, whom he begged for help, gave all Riemann's legacy this to him.

Einstein's dramatic fallacy was his internal rejection of the idea of quantization and, therefore, the concept of uncertainty. He was saying: "The Lord does not cast lots." This is even more surprising considering that 10 years after the creation of the general theory of relativity, Einstein received the Nobel Prize for the photoelectric effect, based precisely on the concept of light quanta. Planck put forward his fundamental postulate of quantization in 1900 and 7 years later only; many outstanding scientists recognized this fact. In addition, Planck always supported Einstein in his endeavors. Despite the idea proposed by Planck, issues of quantization of the physical vacuum (PV) remained unattended by scientists for a long time. Only almost 60 years later, Vyaltsev's monograph devoted to this issue appeared [5]. Later, studies by Zolotarev and Shamshev appeared [6]. However, it did not come to the point of determining the specific physical characteristics of the PV.

Currently, more than a hundred years have passed since Planck's pioneering work, in which the concepts of quantization of energy, moments, spins, etc. were introduced. However, the ideology of PV quantization has not yet been established in modern physics. This is because PV is a medium in which it is difficult to conduct experimental studies with it. The above-mentioned medium has nothing in common with the ether of the last century. As will be shown below, the virtual environment of the PV is fundamentally different from the bar-

yonic component of matter both in energy level and in microscopic and macroscopic characteristics. It represents not only the lowest energy state of matter (its effective temperature can be defined as $T_{\text{eff}} \approx 10^{-29}$ K), but also a virtual quantized environment in which there are no macroscopic movements or dissipative processes. However, all baryon transformations occur precisely in this environment. Consequently, we need to have an indirect way of determining the physical parameters of PV quantization and, on this basis, create a working model of the World.

The key to solving this issue may be the fundamental world “constants”, which, perhaps, “rule” the World. The question has long arisen as to why they have such magnitudes and how they are related to the physical characteristics of the Universe. Thus, the task arises of determining the parameters of the Universe through the main fundamental “constants”. The basic macroscopic parameters of the Universe include the Hubble constant H_0 , the mass of the Universe M_{Un} , the radius of curvature R_{Un} , the virtual electric charge Q_{vir} , the acceleration of the expansion of the Universe a_{Un} , the density of matter in the Universe ρ_{PV} , the number of elementary cells of the PV in the universe N_{Un} . The main microscopic parameters include the dynamic mass of the virtual PV cell - m_{PV} , the time of its existence in the state of a virtual electron and positron t_{PV} , the virtual electric charge q_{vir} , the residual electric charge q_{res} , which includes two equal components: the part responsible for gravitational braking $q_{\text{res,grav}}$ and the component providing the accelerated expansion of the Universe $q_{\text{res,acc}}$.

All parameters of the PV and the Universe as a whole are supposed to be obtained through five global world constants: c – speed of light, gravitational constant G , Planck constant $\hbar$, electron mass m_e , electron charge e . Due to the fact that the effect of gravity is associated with part of the residual virtual charge of the PV cell, it will be shown that the gravitational constant G is obtained through this virtual charge and the dynamic mass of the PV cell. Consequently, this constant is actually not independent and independent.

Preliminary data from the work are presented in articles [7, 8, 9, 10, 11, and 12, 13]. The ideas and solutions proposed by the author are original and new.

3. Structure of PV

We know that PV is not baryonic matter and has the properties of homogeneity and isotropy. There are three states of matter: stable particles, unstable particles and virtual particles. The first two categories of particles are unsuitable for explaining the composition of PV due to the nature of their distribution in space (for example, due to the ability to form gravitationally bound systems). Of the known states of matter for the PV, only a virtual lepton component can

be assumed. A number of observational manifestations can be cited in favor of this conclusion.

1. We observe the effect of PV polarization, when "a fur coats" of virtual electron-positron (e-p) pairs are formed around electric charges, virtual charges of which are oriented in the direction of the real charges.

2. Lamb shift of energy levels in atoms.

3. The difference between the g-factor and an integer value.

4. "Casimir effect" (interaction of mirrors in PV). The movement of flat mirrors towards each other in the PV is recorded and measured in the experiment. This is the most striking evidence of the presence in the PV of electrical interactions between virtual particles with electrons in flat mirrors. Thus, virtual PV cells become observable when they contain charged particles or when virtual particles interact with electrons in atoms.

5. We can add the most important manifestation of PV – the propagation of electromagnetic radiation quanta in the PV environment. The spins of electrons and positrons are equal to 0.5 each, and the spin of a quantum is equal to one. This may mean that in the virtual PV environment, when a quantum is generated, the spins of virtual cells was phased, as a result of which the spin of the quantum becomes equal to unity. In this case, additional deformation of the PV cells that make up the propagating wave packet occurs. A disturbance in the PV medium caused by an electromagnetic wave leads to the fact that the wave packet is discretely transmitted from cell to cell and propagates at the speed of light $c = r_e/t_{PV}$. Consequently, the quantum has no rest mass, and its dynamic mass is determined by the corresponding properties of the PV cells and the frequency of the quantum. Since processes in elementary PV cells occur without energy losses (due to the elementary nature of PV cells), the following picture of the phenomena occurring in each of them is possible.

On the surface of the World, a virtual electron was transformed into a virtual positron and vice versa. This process occurs over the t_{PV} time. The replacement of a virtual electron by a virtual positron and vice versa in each PV cell occurs at a frequency higher than the frequency of the electromagnetic spectrum and has a value of $f \approx 10^{23}$ Hz. This determines the speed of light $c = r_e/t_{PV}$, where r_e is the classical electron radius. Representing a small-scale curvature of space-time, charge and anticharge (e-p-pairs) are connected to each other and form a single whole – an elementary virtual volume of the PV with different curvature on the part of the virtual electron and positron. For an observer in our World, elementary virtual charges can be perceived as dynamic PV elements, in which virtual electrons and positrons replace each other with hyper frequency. On the three-dimensional surface of the Anti-World the picture is similar, but

the curvature of the surface is different (-1). The surfaces of the World and Anti-World are separated by a very small distance of $2r_e$ and were a single whole (Fig. 1). It will be shown below that a necessary condition for the existence of an accelerating expanding Universe is the presence of curvature of the Universe. The curvature is a reflection of the spatial asymmetry of the surfaces of the World and Anti-World. The consequence of this asymmetry is that the volume of the World exceeds the volume of the Anti-World (the volumes are located on the outer and inner surfaces of the three-dimensional sphere).

In this case, the bulk of the mass of the Universe is due to the compensated parts of the virtual charges of electrons and positrons (q_{vir}), and the effect of the expansion of the Universe is a consequence of the uncompensated parts of the charges. It will be shown that the relative charge asymmetry ($q_{res,acc}$) required to produce the observed accelerated expansion of the Universe is only about 10^{-40} times the value of the compensated virtual charge q_{vir} .

During the expansion of the Universe, the wavelength of quanta increases due to an increase in the size of the PV cells (red shift effect). A quantum emitted at any epoch, entering the virtual PV environment, propagates at a speed determined by the parameters of this environment. Therefore, the nature of the redshift may lie in the expanding PV medium.

An equally mysterious element of the lepton component of matter – neutrinos and antineutrinos – can also be a product of PV. In this case, the spin of the antineutrino and neutrino is 0.5. It can be assumed that in the case of weak interactions (for example, during the decay of a neutron), a specific excitation of the PV medium occurs, in which only virtual electrons or only positrons are excited with the formation of neutrinos or antineutrinos.

Unstable particles of the lepton component of matter (muons, tau leptons and their corresponding antiparticles) can be considered as quasi-stable excited states of virtual electrons and positrons. The sizes of these particles are inversely proportional to their masses. They can be considered as the result of the cross section three-dimensional surface of the World by the four-dimensional surface of the additional dimension in which they are located.

The PV cannot serve as an absolute reference system due to the absence of a dedicated coordinate system in the PV. Nevertheless, we observe movement relative to the quanta propagating in it, for example, as a dipole component of the background anisotropy. For a Universe that has spherical symmetry and expands like itself, the ideal manifestation of this effect is compliance with the “Maim cosmological principle”, according to which all physical laws act equally at any point in the Universe and in any direction.

From a physical point of view, such concepts as the inertia of bodies and the interaction of charges at a distance become natural. The dependence of the

inertial properties of bodies on acceleration is associated with the electrical “resistance” of the PV medium when bodies move in it. The small sizes of PV cells of 10^{-13} cm mean that the volume of atoms with dimensions of 10^{-8} – 10^{-9} cm contains 10^{14} – 10^{15} PV cells, which are electrically active elements. When moving at speeds approaching the speed of light, the body experiences virtual electrical resistance from the weakly compressible PV medium. During accelerated motion of a body, the number of PV cells encountered per unit time in front of it and behind it is different, and this difference in the number of cells leads to the appearance of an additional force of virtual electrical resistance. The effect of inertia of bodies is explained precisely by this.

Virtual charges in the PV polarize it, forming “a fur coat” of virtual e-p pairs around the real charges. All elements of “a fur coats” are oriented in the direction of charges. The interaction of charged particles comes down to attraction or repulsion between the virtual elements of the PV, located between the real charges. Consequently, for opposite charges, the virtual e-p pairs between them are equally oriented in space. This leads to the fact that it is “energetically more favorable” for two interacting charges of opposite sign to have common virtual charges in both “coats”. Their number will be less than in the case of “fur coats” of two remote independent charges. Because of this, the distance between different charges begins to decrease.

The mathematical justification for the material presented in this section will be given in subsequent sections of the article. For now, the properties of PV are simply considered without providing rigorous proofs and formulas. We will assume that the PV is a space-time continuum in which all transformations associated with the hadronic component of the matter of the Universe occur.

4. PV parameters

In accordance with the existing metrics of the World, two of its models can be distinguished, discussed in recent decades:

1. $\Omega + \Lambda = 1$ – “flat” World with curvature $k = 0$, density $\Omega = \rho / \rho_{cr} = 1/3$, $\Lambda = \lambda \cdot c^2 / 3H_0^2 = 2/3$ and $\rho_{cr} = 3 H_0^2 / (8\pi \cdot G)$, where G is the gravitational constant, and H_0 is the Hubble constant.

2. $\Omega + \Lambda = 2$ – closed World with spherical symmetry, $k = 1$, $\Omega = \rho / \rho_{cr} = 4/3$, $\Lambda = 2/3$. Accordingly, the value of the average global matter density is twice the critical value: $\rho_{Un} = 2 \rho_{cr}$. In any case, as follows from the above expressions, the Λ -constant and the λ -term in the two models of the World under consideration have the same numerical value. For a “flat” World and a World with spherical symmetry, these expressions are equal:

$$\lambda = 2H_0^2/c^2, \quad (1)$$

Here we mean the Friedmann–Lemaître model of the Universe with a non-zero λ -term [14]. We are here neglect the external pressure of relativistic matter, which is not present in the PV. In this case, the deceleration parameter q_0 is equal to zero. Later we will prove this strictly mathematically for a Universe with spherical symmetry, expanding with acceleration. It will be strictly shown that it is in such a Universe that we live.

Thus, the Hubble constant uniquely determines the value of the λ -term. Insignificant value $\lambda = 2H_0^2/c^2 = 1.28 \cdot 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$ (at $H_0 = 74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) can be explained by the fact that the PV is quantized, and **the quantization elements are PV cells with energy:**

$$E\lambda = \sqrt{\lambda} \cdot (\hbar/2) \cdot c = H_0 \cdot \hbar/\sqrt{2} \approx 1.79 \cdot 10^{-45} \text{ erg}. \quad (2)$$

This expression can be obtained from the Heisenberg uncertainty relation:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2, \Delta E \geq (\hbar/2) \cdot (1/\Delta t), \quad (3)$$

or in case of equality

$$1/\Delta t = \sqrt{\lambda} \cdot c, \Delta E \equiv E\lambda = \sqrt{\lambda} \cdot (\hbar/2) \cdot c. \quad (4)$$

Here ΔE is the energy of the PV cell; Δt is the time it is in a state with the specified energy.

Unit cells of the PV have an effective gravitational mass:

$$m_{PV} = E_\lambda/c^2 = H_0 \cdot \hbar/(\sqrt{2} \cdot c^2) \approx 2,00 \cdot 10^{-66} \text{ g}, \quad (5)$$

where the value was used $H_0 = 74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \approx 2.40 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

The above considerations form the basis of the postulate of the proposed concept: The PV is quantized, and the quantization element is a dynamic virtual PV cell with an effective gravitational mass $m_{PV} = E_\lambda/c^2 = H_0 \cdot \hbar / (\sqrt{2} \cdot c^2)$. The PV is the medium necessary for the propagation of electromagnetic radiation at a speed $c = r_{PV} / t_{PV}$, where $r_{PV} = e^2 / (m_e c^2)$ is the size of the unit cell of the PV (classical electron radius r_e), t_{PV} is the lifetime of a cell in the state of a virtual electron and a virtual positron. As follows from relation (2), the energy of a PV cell is 122 orders of magnitude less than all the energy reserves of the Universe:

$$M_{Un} \cdot c^2 / E_\lambda \approx 0,8 \cdot 10^{122}, \text{ where } M_{Un} \approx 1,6 \cdot 10^{56} \text{ g}. \quad (6)$$

Thus, our Universe contains about $N_{Un} \approx 0.8 \cdot 10^{122}$ virtual cells with effective gravitational dynamic mass (5). The effective gravitational mass of a PV cell is a dynamic virtual mass, since in each PV cell with a characteristic time $t_{PV} \approx 10^{-23} \text{ s}$, virtual e-p and p-e pairs alternate on the surface of our World.

The PV cell size can be obtained from the PV cell density n_{PV} in cubic centimeter:

$$n_{PV} = \rho_{PV} \cdot c^2 / E_\lambda = (3\sqrt{2} \cdot H_0 \cdot c^2) / (4\pi \cdot G \cdot \hbar), \quad (7)$$

given that $\rho_{PV} = 2\rho_{cr} = (3H^2) / (4\pi \cdot G)$ and taking into account (2) we obtain:

$$v_{PV} = 1/n_{PV} = E_\lambda / \rho_{PV} \cdot c^2 = (4\pi \cdot G \cdot \hbar) / (3\sqrt{2} \cdot H_0 \cdot c^2) = \quad (8)$$

$$4/3\pi [(G \cdot \hbar) / (\sqrt{2} \cdot H_0 \cdot c^2)] = 4/3\pi \cdot r_{PV}^3.$$

Hence, the size of the PV cell will be equal to:

$$r_{PV} = [(G \cdot \hbar) / (\sqrt{2} \cdot H_0 \cdot c^2)]^{1/3} \approx 2,85 \cdot 10^{-13} \text{ sm} = r_e. \quad (9)$$

$$t_{PV} = r_{PV} / c = (\sqrt{2}G \cdot \hbar) / (2 \cdot H_0 \cdot c^5)^{1/3} = 0,94 \cdot 10^{-23} \text{ c}. \quad (10)$$

Such an exact coincidence of the PV cell size with the classical electron radius $r_e = 2.82 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ is hardly accidental. If we take a different value of the density of the Universe, for example, $\rho = \rho_{cr}$, then the size of the PV cell will be completely different, $N_{PV} \text{ cm}$ should be twice as large and, therefore, values (5) will need to be taken as half as large, which contradicts basic postulate (2). Thus, the fundamental postulate (2) determines m_{PV} , then r_{PV} and the model of the Universe as a whole. The lifetime of a virtual PV cell is determined from the condition of the speed of propagation of electromagnetic radiation in this environment.

Thus, the sizes of PV cells and their lifetime are determined by the values of the Hubble constant H_0 , microscopic constant $\hbar$, macroscopic constants G and $c = r_{PV} / t_{PV}$. In this case, $r_{PV} \equiv r_e$. As follows from expressions (9, 10), the Hubble constant H_0 , together with the world constants, determines the microscopic quantization parameters of the PV. Consequently, if we obtain an expression for H_0 through world constants, then through them we can determine all other parameters of the World.

5. Derivation of the Hubble constant through world “constants”

Thus, the key role of the Hubble constant in constructing the current model of the World becomes obvious. Substituting expressions for “constants” into (5), we obtain the formula for the Hubble constant:

$$H_0 = G \cdot \hbar / (r_e^3 \cdot \sqrt{2} \cdot c^2). \quad (11)$$

Expression $r_e = e^2 / (m_e \cdot c^2)$ substitute into (11) and get:

$$H_0 = \hbar \cdot G \cdot m_e^3 \cdot c^4 / (\sqrt{2} \cdot e^6) \equiv H_0 = 2.48 \cdot 10^{-18} \text{ c}^{-1}, \quad (12)$$

$$H_0 = 76.31 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}.$$

Now, from formulas (1, 2, 12) we find the values for the λ -term, E_λ end t_{PV} :

$$\lambda = 2H_0^2 / c^2 = (\hbar^2 \cdot G^2 \cdot m_e^6 \cdot c^6) / e^{12} = 1.36 \cdot 10^{-56} \text{ cm}^{-2}, \quad (13)$$

$$E_\lambda = \sqrt{\lambda \cdot (\hbar / 2) \cdot c} = (\hbar^2 \cdot G \cdot m_e^3 \cdot c^4) / 2e^6 = 1.84 \cdot 10^{-45} \text{ erg}, \quad (14)$$

$$t_{PV} = r_e / c = e^2 / (m_e \cdot c^3) = 0,94 \cdot 10^{-23} \text{ c}. \quad (15)$$

Thus, the fundamental expression of the Hubble constant is obtained through five world constants. The constants e and m_e indicate that the composition of the PV is determined by the lepton component of the substance. Planck's constant $\hbar$ indicates the fact of quantization of the PV medium. The global constants G and c determine the gravitational properties of the PV and the fact that the PV is a medium for the propagation of electromagnetic radiation. It is extremely important that H_0 be obtained within the framework of a closed World model with spherical symmetry. Its value $76.31 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ is in excellent agreement with observational data of $74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. The difference is only 3 percent. In addition, there is one important note. We are talking about the global value of H_0 , but its local value is measured, and there may be some difference between them due to the peculiarities of our location in the Galaxy and galaxy clusters.

We can conclude that the numerical value of the Hubble constant is uniquely related to the model of our Universe. **The data obtained indicate that we live in a closed Universe with spherical symmetry, where the average density of matter is $\rho_{\text{un}} = 2\rho_{\text{cr}}$. Thus, we live in a giant black hole, the physical characteristics of which we can determine through five world “constants”.**

A distinctive feature of the considered model of the World is that solving the gravitational equations for a world with spherical symmetry gives the same result both in the Newtonian approximation and in the general theory of relativity. This may be because the PV elements do not move at relativistic speeds, and there are no relativistic gravitational potentials in the PV environment. In the future, in our calculations of PV we will use the Newtonian approximation.

6. Fundamental Dirac constant «k»

Scientists have long wondered whether there are dimensionless world constants that unite dimensional fundamental quantities. Back in 1937, Dirac suggested that there is a dimensionless world constant k , which can relate microscopic and macroscopic world constants. However, he was unable to find the exact value of this constant and its connection with the parameters of the Universe. The dimensionless world constant that we introduce will bear the name of Dirac as the “Fundamental Dirac constant” in honor of the fact that he first noted the possibility of its existence.

Since the Universe is expanding and the scale factor is changing with time, Dirac suggested the possibility of compensating for this change by changing the gravitational constant G , believing that it should decrease with time. However, he was unable to substantiate his assumption. The importance of this assumption was that Dirac allowed the very possibility of constants changing over time.

In our consideration, this constant is also dimensionless. It determines the fundamental connection between world constants and the physical characteristics of our World. That is why this constant has a deep physical meaning. Based on constant k , we found dimensionless dependencies connecting the physical parameters of the World with each other. These ratios for k are given in Table 1:

Table 1. Fundamental constant k , expressed in terms of microscopic and macroscopic parameters of the Universe:

$k=(t_{PV} \cdot H_0)^{-1} = 4,30 \cdot 10^{40}; k=R_{Un}/r_e = 4,30 \cdot 10^{40}$
$k=(M_{Un}/m_{PV})^{1/3} = 4,30 \cdot 10^{40}; k=q_{vir}/q_{res} = 4,30 \cdot 10^{40}$
$k=(N_{Un})^{1/3} = 4.30 \cdot 10^{40}; k = \sqrt{2e^4 / (G \cdot \hbar \cdot m_e^2 \cdot c)} = 4,30 \cdot 10^{40}$

Notes on the table: Among the “constants”, G is the least precisely defined. Its accuracy is limited to 2–3 decimal places. Therefore, in calculations we will limit ourselves to two decimal places. However, we will perform our own calculations with higher accuracy.

In the proposed concept, the Universe is expanding while maintaining spherical symmetry. At the same time, the relationships between its main parameters must remain unchanged. The physical categories existing in the Universe are mass [g], time [s], length [cm], speed [cm s⁻¹], acceleration [cm s⁻²], and charge [e. s. u] (electrostatic units). The dimension of the squared charge is e² [g cm³ s⁻²]. Dimensionless relations for k were obtained keep in mind the dimensions of physical quantities that exist for dark energy in the Universe.

It is most simple to start deriving k for the expression $k=(t_{PV} \cdot H_0)^{-1}$. Substituting data (10, 12) into this expression, we obtain the formula k , expressed in terms of 5 world “constants”: $k = \sqrt{2e^4 / (G \cdot \hbar \cdot m_e^2 \cdot c)} = 4.30 \cdot 10^{40}$ (Table 1).

For the second expression we have $k = R_{Un} / r_e = c / (H_0 \cdot r_e) = 4.30 \cdot 10^{40}$, which is equal to the first ratio obtained for k . Here we used the relation $R = c/H_0 = 1.21 \cdot 10^{28}$ cm. Considering that $G \cdot M_{Un}^2 / R_{Un} = M_{Un} \cdot c^2$ and keeping in mind (12), we get:

$$M_{Un} = R_{Un} \cdot c^2 / G = c^3 / (H_0 \cdot G) = \sqrt{2e^6 / (\hbar \cdot G^2 \cdot m_e^3 \cdot c)} = 1.63 \cdot 10^{56} \text{ g.} \quad (16)$$

Using (5, 12, 16) for m_{PV} , H_0 and M_{Un} , We will have $k = (M_{Un} / m_{PV})^{1/3} = \sqrt{2 \cdot e^4 / (G \cdot \hbar \cdot m_e^2 \cdot c)} = 4.30 \cdot 10^{40}$ (Table 1).

For $k = q_{\text{vir}} / q_{\text{res}}$ we must define the components of this expression. In accordance with the proposed concept, the dynamic mass of the virtual PV cell m_{PV} has a virtual charge q_{vir} e-p pair, which determines the energy of the PV cell. Based on the parameters of the PV cell (2), we can write:

$$E_{\lambda} = \hbar \cdot H_0 / \sqrt{2} = q_{\text{vir}}^2 / r_e. \quad (17)$$

Further, taking into account (12) we obtain:

$$q_{\text{vir}} = (\hbar \cdot m_e \cdot c \cdot G^{1/2}) / (\sqrt{2} \cdot e^2) = 2,28 \cdot 10^{-29} \text{ e.s.u.} \quad (18)$$

The virtual residual charge q_{res} of the PV cell arises due to the presence of an asymmetry between the charges of the virtual electron and positron. This asymmetry arises because the surfaces of the World and Anti-World have slightly different volumes. Consequently, the volumes occupied by particles and antiparticles on two surfaces are different.

Spherical surfaces of the World and Anti-World, separated by a distance $\Delta r = 2r_e$. In the future, it will be justified that different volumes of elementary particles are equivalent to different charges. The difference is insignificant – at the level of 10^{-40} e.s.u. By this amount, the virtual electron dominates the charge over the positron. However, it is precisely this very small uncompensated difference in the virtual charge of the electron and positron that determines the new fundamental properties of the Universe.

To determine the value of the residual charge of the virtual electron q_{res} , we first obtain an expression for accelerating the increase in the size of the PV cell. For a closed Universe with spherical symmetry, the circular speed of light and macroscopic acceleration are:

$$a_{\text{Un}} = c^2 / R_{\text{Un}} = G \cdot M_{\text{Un}} / R^2 = c \cdot H_0 = 7,41 \cdot 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}. \quad (19)$$

For acceleration at the microscopic level, we have:

$$a_{\text{mic}} = (r_e / R_{\text{Un}}) \cdot a_{\text{Un}} = r_e \cdot c^2 / R_{\text{Un}}^2, \quad (20)$$

$$a_{\text{mic}} = r_e \cdot H_0^2 = 1,72 \cdot 10^{-48} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}. \quad (21)$$

The virtual residual electric charge of the PV cell contains two identical components at the 10^{-40} level: $q_{\text{res}} = q_{\text{res, grav}} + q_{\text{res, acc}}$. The first part compensates for the gravitational component of the PV; the second ensures the accelerated expansion of the Universe. The forces created by residual virtual charges are equal to:

$$F_{\text{res, acc}} = q_{\text{res, acc}}^2 / r_e^2 = m_{\text{PV}} \cdot a_{\text{mic}} = m_{\text{PV}} \cdot r_e \cdot H_0^2, \quad (22)$$

where is the residual charge that creates the accelerated expansion of the Universe:

$$q_{\text{res, acc}} = (m_{\text{PV}} \cdot r_e^3)^{1/2} \cdot H_0 = \hbar^2 \cdot G^{3/2} \cdot m_e^3 \cdot c^2 / (2e^6) = 5,30 \cdot 10^{-70} \text{ e.s.u.},$$

where, in accordance with (5), the exact value of m_{pV} is:

$$m_{pV} = H_0 \cdot \hbar / (\sqrt{2} \cdot c^2) = 2.05 \cdot 10^{-66} \text{ g.} \quad (23)$$

Then, based on (18, 23), the “Fundamental Dirac constant” k will have a numerical value (Table 1):

$$k = q_{vir} / q_{res,acc} = 4.30 \cdot 10^{40}. \quad (24)$$

We will find the number of PV cells in the Universe using relations (16, 23):

$$N_{Un} = M_{Un} / m_{pV} = \sqrt{2} \cdot c^5 / (H_0^2 \cdot G \cdot \hbar), \quad (25)$$

$$N_{Un} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{12} / (\hbar^3 \cdot G^3 \cdot m_e^6 \cdot c^3) = 0.80 \cdot 10^{122} \quad (26)$$

and

$$Q_{res,Un} = q_{res,acc} \cdot N_{Un} = 4.2 \cdot 10^{52} \text{ e.s.u.}$$

Therefore (Table 1):

$$k = (N_{Un})^{1/3} = 4.30 \cdot 10^{40}. \quad (27)$$

The fundamental constant k underlies the structure of the World and serves as a scale factor between the microscopic and macroscopic parameters of our Universe. A slight asymmetry of e-p pairs at the level $1/k = r_e/R_{Un}$ in each PV cell leads to a uniform accelerated expansion of the three-dimensional surfaces of the World and Anti-World. And this predominance of the virtual charge of the electron over the virtual charge of the positron is sufficient to create the total uncompensated virtual charge of the Universe $Q_{res,Un}$ and the effect of accelerated expansion of our World with acceleration (19).

As has been shown, the size of the elementary cells of the PV on the surface of the World is equal to the classical radius of the electron. This can also be shown using the apparent relationship between cell radiuses of curvature r_{pV} , mass m_{pV} and PV cell virtual charge q_{vir} :

$$r_{pV} = q_{vir}^2 / (m_{pV} \cdot c^2). \quad (28)$$

Substituting for q_{vir} its expression (18), for m_{pV} (23) and for H_0 (12), we obtain:

$$r_{pV} = e^2 / (m_e \cdot c^2) \equiv r_e. \quad (29)$$

We received a fundamental conclusion: virtual and real charges have the same size, which seems quite logical.

7. Microscopic dynamic elements of PV

What is each microscopic dynamic element of space-time? It has certain physical properties, confirmed by experiments with elementary particles. The

parameters of elementary particles of the lepton component of matter include mass m_e , charge e , spin, expressed in units $\hbar$; property of elementary particles called “strangeness”, expressed in units of ± 1 .

If these parameters are extended to the virtual lepton component, then it is natural to imagine the existence of two interconnected elements of the surfaces of the World and the Anti-World. Taking into account the different curvature of the surfaces of these elements, expressed in the different strangeness of electrons $+1$ and positrons -1 , we can assume that for the World, we have an external three-dimensional spherical surface, and for the Anti-World we have an internal three-dimensional surface. Both surfaces form a single whole, and on these surfaces, there are common dynamic virtual e-p and p-e pairs. (Fig. 1).

Each dynamic element of the PV is an elementary volume on the surfaces of the World and Anti-World, transforming e-p pair to p-e and vice versa during the time t_{PV} . At the same time, additional quantum reciprocating rotational motions around the common axis of the e-p pair may take place, providing the spin of the virtual electron $+1/2$ and the virtual positron $-1/2$ in units of $\hbar$. The process of transformation of e-p pairs occurs with a change in the curvature and shape of each virtual dynamic element.

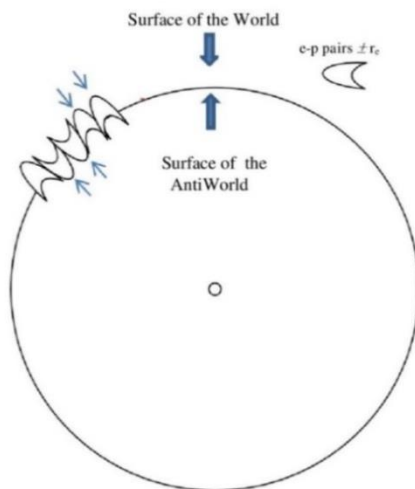


Fig. 1. Surfaces of the World and Anti-World

The convex surface of a virtual electron transforms into the concave surface of a virtual positron and vice versa (Fig. 1). In this conventional graphical representation, a positron can be represented as an elementary volume of space, concave on all four sides. The volume of space occupied by a positron is 10^{-40}

less than that occupied by an electron. This curvature of the positron leads to the fact that when two such particles approach each other, the electric potential between them decreases and, consequently, the particles approach each other. In the case of two electrons, the opposite happens. As they approach each other, the potential between them increases and the particles are repelled from each other. This is the meaning of the interaction of infected particles, both real and virtual, in the PV environment. Mutual transformations of e-p pairs occur without loss of energy, taking into account the elementary nature of the charges.

We can only speculate how virtual particles can behave on the surface of the Anti-World, given that antiparticles must be the complete opposite of particles if pure energy is generated during their annihilation. Antiparticles have opposite charge, spin, and curvature (strangeness). As for the mass of the positron, although the concept of negative mass exists in our scientific literature, it is not clearly stated. Such a concept exists, for example, in the theory of quantum evaporation of black holes. The introduction of the concept of time t_{Un} and anti-time t_{AntiUn} leads to the fact that in symmetrical connected Worlds, this category may be absent and at the microscopic level, the concepts of general time, entropy and dissipative processes may not make sense. However, we live on the surface of the World and the category of time exists for us.

In the proposed concept, PV is just a space-time continuum with its own characteristics at the microscopic and macroscopic levels. At the microscopic level, each element of the PV space is characterized by an effective dynamic mass $m_{pV}=q_{vir}^2/(r_e \cdot c^2)$. In this case, each virtual e-p pair forms a virtual charge (compare with 18):

$$q_{vir} = (m_{pV} \cdot r_e)^{1/2} \cdot c = 2,28 \cdot 10^{-29} \text{ e.s.u.} \quad (30)$$

The m_{pV} value is obtained by formula (23).

On the surface of the World, the radius of curvature of virtual electrons and positrons differs by a small amount of the order of 10^{-40} . The difference arises because on the surface of the World there are repulsive forces between virtual electrons and attractive forces between virtual positrons, which is a consequence of the different curvature of both (Fig. 1). As a result, the size of virtual positrons on the surface of the World is $1/k$ less than the size of virtual electrons. The total difference in the radii of curvature e-p pairs leads to the formation of the radius of curvature of the surface of the World R_{Un} .

8. The connection between microscopic and macroscopic parameters of PV

The surfaces of the World and Anti-World are separated from each other by a distance $\Delta R = 2r_e$ (Fig. 1). Relative difference $2r_e/R_{Un}=2/k$ (Table 1). At the

microscopic level, the relative difference in the radii of curvature of the charges located on the surfaces of the World and the Anti-World is equal to the same value: $\Delta r/r_e = 2/k$.

From a physical point of view, the residual charge q_{res} arises due to the difference in the curvature of the charges located on the surfaces of the World and Anti-World. The relationship between mass, charge and the difference between the radii of curvature of the electron and positron $\Delta r = 2r_e/k$ can be written analytically:

$$q_{\text{res}}^2 / \Delta r_e = m_{\text{PV}} \cdot c^2 / k, \quad (31)$$

where

$$q_{\text{res}}^2 = m_{\text{PV}} \cdot 2r_e \cdot c^2 / k^2 = q_{\text{res, grav}}^2 + q_{\text{res, acc}}^2 = 28.05 \cdot 10^{-140} (\text{e.s.u.})^2 + 28.05 \cdot 10^{-140} (\text{e.s.u.})^2, \quad (32)$$

$$q_{\text{res, grav}} \approx q_{\text{res, acc}} \approx 5.30 \cdot 10^{-70} \text{ e.s.u.}$$

This also takes into account the fact that the effective mass of the residual charge q_{res} is k times less than the mass q_{vir} .

We can conclude that a slight difference in the microscopic curvature of virtual electrons and positrons (at the level of 10^{-40}) gives rise to a residual uncompensated virtual charge, which forms the dynamic characteristics of our Universe.

Based on the known relationship $Q^2/R^2 = G \cdot M^2/R^2$ in microscopic terms, we obtain:

$$q_{\text{res}}^2 = G \cdot m_{\text{PV}}^2, \quad (33)$$

$$G = q_{\text{res}}^2 / m_{\text{PV}}^2 = 28.16 \cdot 10^{-140} (\text{e.s.u.})^2 / 2.05 \cdot 10^{-132} \text{ g}^2 = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ g}^{-1} \cdot \text{cm}^3 \text{ s}^{-2}$$

At the microscopic level, we have obtained a fundamental expression for the gravitational constant, based on the residual virtual-electric interaction of PV cells. This once again confirms the idea that in PV there is no concept of gravity, but there is only an idea of the physical property of vacuum, based on virtual-electric interactions on the surfaces of the World and Anti-World. Looking at expression (33), one can only wonder how the value of the global gravitational constant G was obtained from the ratio of such insignificant quantities.

A slight difference in the sizes of virtual electrons and positrons (at the level of 10^{-40}) leads to the fact that during hyper frequency oscillations with transformations of e-p pairs, virtual electrons are forced to “squeeze” into the surface of the Anti-World, where there is less space than on the surface of the World. In this case, the virtual electrons are deformed (at a level of 10^{-40} of their own volume) and as a result, the expansion of the Universe slows down. This is the essence of the “gravity” of PV.

Thus, in fact, the gravitational force of the PV does not exist at all in our Universe. At the microscopic level, each PV cell has a residual uncompensated virtual electron charge q_{res} , half of which is used to overcome the “resistance” of the Anti-World. The other half of this virtual charge is used to create the accelerated expansion of the Universe. Both components are equal to each other up to the value $1/k$, which is also a consequence of the spherical metric of our closed Universe.

The existence of a residual (uncompensated) virtual charge of PV cells leads to the appearance of a total virtual charge of the Universe (26, 31, 32):

$$\begin{aligned} q_{\text{res,grav}} \cdot N_{\text{Un}} + q_{\text{res,acc}} \cdot N_{\text{Un}} &= Q_{\text{Un,grav}} + Q_{\text{Un,acc}} \\ &= 4.22 \cdot 10^{52} \text{ e.s.u.} + 4.22 \cdot 10^{52} \text{ e.s.u.} \end{aligned} \quad (34)$$

As in the case of virtual PV cells, at the macroscopic level, the residual charge component $Q_{\text{res,grav}}$ compensates for the so-called “gravitational” force of attraction of the PV, another charge component, $Q_{\text{res,acc}}$, leads to the accelerated expansion of the Universe. It should be taken into account that the gravitational attraction of the PV is associated with the reaction of the surface of the Anti-World, slowing down the expansion of the World during hyper frequency transformations of e-p pairs, when they are deformed during quantum transitions to the surface of the Anti-World. In accordance with the virtual electric macroscopic force causing the accelerated expansion of the Universe $Q_{\text{res,acc}}^2/R_{\text{Un}}^2 = M_{\text{Un}} \cdot a_{\text{acc}}$, we obtain the expression for this acceleration:

$$\begin{aligned} a_{\text{Un,acc}} &= Q_{\text{res,acc}}^2 / (R_{\text{Un}}^2 \cdot M_{\text{Un}}) = \\ (G \cdot \hbar \cdot m_e^3 \cdot c^5) / (e^6 \cdot \sqrt{2}) &= 7.42 \cdot 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}. \end{aligned} \quad (35)$$

Now we know the exact value of the acceleration with which the expansion of the Universe occurs.

Using the ideology of quantization of the PV environment allows us to obtain the most important parameter of the Universe – ρ_{Un} , expressed in terms of world constants (12):

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Un}} &= 2\rho_{\text{cr}} = 3H_0^2 / (4\pi \cdot G) = (3G \cdot \hbar^2 \cdot c^8 \cdot m_e^6) / (8\pi \cdot e^{12}). \\ \rho_{\text{Un}} &= 2.19 \cdot 10^{-29} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}. \end{aligned} \quad (36)$$

The macroscopic parameters also include the radius of curvature of the Universe (16, 34):

$$R_{\text{Un}} = c/H_0 = \sqrt{2e^6 / (G \cdot \hbar \cdot m_e^3 \cdot c^3)}, \quad (37)$$

$$R_{\text{Un}} = Q_{\text{Un,acc}}^2 / M_{\text{Un}} \cdot c^2 = 1.21 \cdot 10^{28} \text{ cm}, \quad (38)$$

and the mass of the Universe (16, 34):

$$M_{Un} = c^3 / (G \cdot H_0) = Q_{Un}^2 / (R_{Un} \cdot c) = \sqrt{2} e^6 / (G^2 \cdot \hbar \cdot m_e^3 \cdot c) = 1.63 \cdot 10^{56} \text{ g}. \quad (39)$$

Using expressions (23 and 36), we obtain the value of the number of PV cells per cm^3 :

$$N_{Un}/\text{cm}^3 = \rho_{Un}/m_{PV} = (3c^6 \cdot m_e^3) / (4\pi \cdot e^6) = 1.07 \cdot 10^{37}. \quad (40)$$

Total number of PV cells in the Universe:

$$N_{Un} = M_{Un}/m_{PV} = (2\sqrt{2} \cdot e^{12}) / (G^3 \cdot c^3 \cdot \hbar^3 \cdot m_e^6) = 0.80 \cdot 10^{122}. \quad (41)$$

The virtual electric charge of the Universe of spherical symmetry, leading to its accelerated expansion, can be found from equations (32, 41):

$$Q_{Un,acc} = q_{res,acc} \cdot N_{Un} = \sqrt{2} \cdot e^6 / (G^{3/2} \cdot \hbar \cdot m_e^3 \cdot c) = 4.22 \cdot 10^{52} \text{ e.s.u.} \quad (42)$$

Acceleration due to the “action” of the λ -term is equal to (35, table 1):

$$a_\lambda = a_{Un,acc} = c^2 / (k \cdot r_e). \quad (43)$$

The same acceleration expressed in terms of the λ -term (2):

$$a_\lambda = H_0 \cdot c = \sqrt{(\lambda/2)} \cdot c^2 = 7.42 \cdot 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}. \quad (44)$$

For the macroscopic level we can write (16, 34, 37):

$$a_\lambda = a_{Un,acc} = Q_{res,acc}^2 / (R_{Un}^2 \cdot M_{Un}) = 7.42 \cdot 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}. \quad (45)$$

According to expression (32), the gravitational constant G is determined by the microscopic parameters of the PV: $q_{res, grav} = q_{res, acc}$ and m_{PV} . A more accelerated expansion of the surface of the World is prevented by the surface of the Anti-World. This is due to the deformation of the PV cells when they are “pressed” into the surface of the Anti-World. The magnitude of the deformation is insignificant and is at the level of 10^{-40} of the re value. The difference in the sizes of the surfaces of the World and the Anti-World has exactly the same significance. As a result, we received the value $q_{res, grav} = q_{res, acc}$ and $a_{Un, grav} = a_{Un, acc}$.

Another important conclusion follows from expression (38). The radius of curvature of the Universe is determined not only by its mass – M_{Un} , but also by the uncompensated charge $Q_{Un,acc}^2$ or $Q_{Un,grav}^2$.

For the mass of the Universe, we can also write:

$$M_{Un} = m_{PV} \cdot N_{Un}, \quad m_{PV} = q_{vir}^2 / (r_e \cdot c^2), \quad (46)$$

$$M_{Un} = (q_{vir}^2 / (r_e \cdot c^2)) \cdot N_{Un}. \quad (47)$$

Thus, the total virtual charges of e-p pairs create the phenomenon of the main lepton mass of the Universe. The total virtual uncompensated charges of e-p pairs create the phenomenon of force that compensates for the “gravitation-

al” component and leads to the accelerated expansion of the Universe. The “gravitational” part of the virtual charges of the Universe participates in the formation of its radius of curvature R_{Un} :

$$R_{Un} = (q_{res,grav}^2 \cdot N_{Un}) / (m_{PV} \cdot c^2). \quad (48)$$

The total virtual uncompensated charge of e-p pairs creates forces that compensate for the slowdown in the expansion of the Universe created by the surface of the Anti-World on the one hand and leads to the accelerated expansion of the Universe on the other. The gravitational component of the virtual charges of the Universe participates in the formation of its radius of curvature.

9. Where does the space of the World and Anti-World come from with the accelerated expansion of the Universe?

Thus, our Universe is expanding with acceleration and its volume is increasing at a rate of $\Delta V_{Un} \sim R^2 \cdot c$. If space is quantized, where does the extra volume ΔV_{Un} come from every second? The answer can only be this: from the additional dimension in which the World and the Anti-World are immersed. The inextricable connection of each of the Worlds with each other inevitably leads us to the conclusion about the existence of a single 10-dimensional space-time: five dimensions in each of the interconnected World and Anti-World (four spatial and one temporal in each).

The predominance of the electron charge over the positron charge is the driving force behind the expansion of the Universe. In the structure of the PV there are no other forces except virtual-electric ones. The surface of our World is like the bowstring of a drawn bow. After we release the tense bowstring, the curvature of the bow decreases and the arrow flies out with acceleration. As the radius of the Universe increases, its volume also increases due to the “pulling out” of space from the additional fourth spatial dimension in which our Universe is located. In this sense, each PV cell is a microscopic black hole participating in the formation of a macroscopic black hole (our Universe).

What is the physical essence of the phenomena of space and charge as an element of the material environment? Based on the charge dimension $Q^2 = [g \text{ cm}^3 \text{ s}^2]$ we can write (16, 26, 37 and 38):

$$Q_{Un,acc}^2 = M_{Un} \cdot R_{Un}^3 \cdot H_0^2 = 17,81 \cdot 10^{104} (\text{e.s.u.})^2, \quad (49)$$

$$Q_{Un,acc} = 4,22 \cdot 10^{52} \text{ e.s.u.},$$

Which coincides with expression (42).

Considering that, M_{Un} and H_0 are constant quantities in time and $R_{Un}^3 \approx V_{Un}$, we can write:

$$Q_{Un,acc}^2 \approx \text{Const}_{Mac} \cdot V_{Un}. \quad (50)$$

This shows that the physical essence of the charge phenomenon lies in the volume of space-time it occupies. At the microscopic level, expression can be rewritten:

$$q_{res,acc}^2 = m_{pV} \cdot H_0^2 \cdot r_e^3 = q_{res,acc}^2 = q_{res,grav}^2 = 28,06 \cdot 10^{-140} (\text{e.s.u.})^2, \quad (51)$$

$$q_{res,acc} = q_{res,grav} = 5,30 \cdot 10^{-70} \text{ e.s.u.}$$

and then

$$q_{res,acc}^2 \approx \text{Const}_{Mic} \cdot V_{pV}.$$

Considering that, m_{pV} and H_0 do not change during the expansion of the Universe, we can conclude: **the square of the residual charge or the product of two charges, both microscopic and macroscopic, ensuring the accelerated expansion of the Universe (or its gravitational deceleration) is proportional to the volume of space-time occupied by these charges.** The mass of the Universe M_{Un} and the Hubble constant H_0 serve as a coefficient of proportionality in the relation connecting the square of the charge with the volumes of space-time occupied by these charges.

From (51) the following relation follows:

$$R_e^3 = q_{res,acc}^2 / (m_{pV} \cdot H_0^2), \quad (52)$$

$$r_e = [q_{res,acc}^2 / (m_{pV} \cdot H_0^2)]^{1/3}.$$

Thus, we have obtained a connection between the classical electron radius and the parameters of virtual e-p pairs through the constant H_0 .

Analyzing formulas (50, 51), we can draw two important conclusions:

1. The square of the charge, or the product of interacting virtual charges, is directly proportional to the volume of space occupied by these charges. The PV consists only of interacting, interconnected virtual charges. The set of microscopic characteristics of the PV determines the macroscopic parameters of the Universe.

2. The numerical value of the classical electron radius can be expressed in terms of the uncompensated residual charge and the dynamic mass of the virtual PV cell. The fundamental constant H_0 in this case serves as a proportionality coefficient.

Thus, the essence of the PV can be considered a set of 10^{122} elementary e-cells densely packed in the total volume of space. These cells participate in con-

tinuous hyper frequency quantum oscillations with the mutual transformation of electrons and positrons into each other. The physical basis for the emergence of a new volume of the PV is the presence of curvature of the World–Anti-World surface, which creates a slight predominance of the electron charge over the positron. As the volume of the PV increases, the magnitude of the interacting e–p charges increases. The rate of expansion of the Universe and acceleration increase proportionally to the change in the scale factor.

It is necessary to prove that H_0 is indeed a fundamental constant that does not change with the accelerated expansion of the Universe. In this regard, let us dwell in more detail on the relationship we obtained for the dimensionless global Dirac constant (Table 1): $k = t_{PV} \cdot H_0$. This expression contains H_0 and t_{PV} . Therefore, if we prove that H_0 is an independent time-invariant constant, then the constancy of t_{PV} in time will automatically follow.

In a Universe expanding with acceleration a_{un} , for any arbitrarily chosen points located at a distance of one Mpc from each other, the speed of their mutual removal will always be equal to $H_0 \text{ km s}^{-1}$. This follows from the very definition of the Hubble constant and the dependence of the expansion rate of the Universe on time $R(t)$:

$$H_0 = \dot{R}(t) / R(t) = (d/dt (R(t)) / R(t) = c \cdot R^{-1}. \quad (53)$$

The expansion rate $\dot{R}(t)$ is always proportional to $R(t)$, so the ratio of these quantities remains constant. That is, $H_0 = \text{Const.}$ at any moment in time. Therefore, $t_{PV} = \text{Const.}$ also ($k = \text{Const.}$, table 1).

At the microscopic level, keeping t_{PV} unchanged means a stable value of the frequency of hyper frequency oscillations of e–p pairs on the surfaces of the World and Anti-World. These processes occur without energy loss due to the elementary nature of the PV cells. As the Universe expands, the sizes of virtual charges increase. It should be remembered that there are virtual uncompensated charges q_{res} , the value of which increases with the expansion of the Universe. These charges maintain the constancy of hyper frequency oscillations of the PV cells.

The most important macroscopic parameter of the Universe is the deceleration parameter q_0 :

$$q_0 = (\ddot{R}(t) \cdot R(t)) / \dot{R}(t)^2 = \{[d/dt(\dot{R}(t))] \cdot R(t)\} / \dot{R}(t)^2. \quad (54)$$

By multiplying and dividing by $R^2(t)$, expression (54) is transformed to the form:

$$q_0 = d/dt (H_0 / H_0^2) = 0. : \quad (55)$$

Fundamental conclusions were obtained:

1. $H_0 = \text{const.}$ and, therefore, $q_0 = 0$, i.e. in an expanding Universe, where the expansion rate is proportional to the scale factor, the deceleration parameter $q_0 = 0$.

2. The time of quantum transformations of e-p pairs t_{pV} is a universal constant independent of time.

10. Constants in the Universe

In an expanding Universe, the scale factor is constantly increasing, so that all the so-called world “constants” that it is included in change in time. These include microscopic and macroscopic “constants”: elementary charge e [$\text{g}^{1/2} \cdot \text{cm}^{3/2} \cdot \text{s}^{-1}$], classical electron radius r_e [cm], gravitational constant [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$], Planck’s constant $\hbar$ [$\text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], speed of light c [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]. At the same time, the dependence of different “constants” on the scale factor is different (Table 2).

Table 2. Dependence of “constants” on the scale factor

e^2	r_e	$\hbar$	G	c	a_{Un}	λ	$Q_{Un,res}^2$	R_{Un}	V_{Un}
cm^3	cm	cm^2	cm^3	cm	cm	cm^{-2}	cm^3	cm	cm^3

Table captions: e – electron charge; r_e – classical electron radius; $\hbar$ – Planck’s constant; G – gravitational constant; c – speed of light; a_{Un} – acceleration of the expansion of the Universe; “ λ ” – λ -term; $Q_{Un,res}$ – residual virtual charge of the Universe; R_{Un} – radius of curvature of the Universe; V_{Un} – volume of the Universe.

The table shows that such important parameters of the Universe as the rate of its expansion and the acceleration with which this expansion occurs depend on the scale factor. It is also clear that, taking into account the nature of the change in r_e , e^2 and the speed of light c from the scale factor, we can conclude that m_e is a time-independent constant. It is also necessary to mention one of the most remarkable quantities used in physical considerations – the fine structure constant (FSC) = $e^2 / (\hbar \cdot c) = 7.30 \cdot 10^{-3} = 1/137$, also independent of time. FSC cannot be derived theoretically; it characterizes the strength of interaction of electric charges with photons and is determined on the basis of experimental data. It is one of 20 parameters introduced into the standard model of particle physics. Sommerfeld introduced FSC in 1916 to calculate the magnitude of relativistic corrections when describing spectral lines using the Bohr model. From a physical point of view, quantum effects occur in the microcosm during the interaction of electrons in atoms. The energy change occurs when electrons exchange virtual photons. In Sommerfeld’s own interpretation, the FSC value is the ratio of the speed of the electron in Bohr’s first circular orbit to the speed of light c .

Studies of possible FSC changes carried out at the National Physical Laboratory of Great Britain and the Physicotechnical Laboratory of Germany gave limits for these changes: $\Delta\alpha/\alpha < 2 \cdot 10^{-17}$ per year and $\Delta\alpha/\alpha < 2 \cdot 10^{-17}$ per year respectively [15]. Thus, during the existence of the Universe, the dimensionless constant α is a true constant that does not depend on time, just like the global Dirac constant k . The list of time-invariant microscopic and macroscopic constants of the Universe is given in Table 3.

Table 3. Macroscopic and microscopic PV constants

k (Table 1)	H₀ (11)	M_{Un} (39)	N_{Un} (41)
$4.30 \cdot 10^{40}$	$2.47 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$	$1.63 \cdot 10^{56} \text{ g}$	$0.80 \cdot 10^{122}$
t_{PV} (15)	m_e	m_{PV}	$\alpha = e^2 / (\hbar \cdot c)$
$0.94 \cdot 10^{-23} \text{ s}$	$9.11 \cdot 10^{-28} \text{ g}$	$2.05 \cdot 10^{-66} \text{ g}$	$7.30 \cdot 10^{-3}$

Table caption: t_{PV} – virtual time of the PV cell; H₀ – Hubble constant; M_{Un} – mass of the Universe; m_e – electron mass; m_{PV} – PV cell mass; k – “Fundamental Dirac constant”; α – fine structure constant FSC, N_{Un} – number of PV cells in the Universe.

A special role is given to the dimensionless constant k . It connects all the microscopic and macroscopic constants of the Universe with each other. One of the most important of these connections is $k=(t_{PV} \cdot H_0)^{-1}$ where a relationship is established between three time-independent constants. A connection is established between the Hubble constant and world time set by hyper frequency oscillations $H_0 = 1/(k \cdot t_{PV})$. The time of hyper frequency oscillations and the constant k uniquely determine the Hubble constant, or the expansion rate of the Universe. The result is not at all obvious at first glance.

The parameters of the Universe obtained based on five “constants” are given in Table 4.

Table 4. Macroscopic and microscopic parameters of PV, obtained through 5 “constants”

R_{Un} (cm)	M_{Un} (g)
$\sqrt{2 \cdot e^6 / (G \cdot \hbar \cdot m^3 e \cdot c^3)}$	$\sqrt{2 \cdot e^6 / (G^2 \cdot \hbar \cdot m^3 e \cdot c)}$
$1.21 \cdot 10^{28}$	$1.63 \cdot 10^{56}$
Q_{Un} (e.s.u.)	H₀ (s⁻¹)
$\sqrt{2 \cdot e^6 / (G^3/2 \cdot \hbar \cdot m^3 \cdot e \cdot c)}$	$(G \cdot \hbar \cdot m^3 \cdot e \cdot c^4 / \sqrt{2 \cdot e^6})$
$4.22 \cdot 10^{52}$	$2.48 \cdot 10^{-18}$

$a_{Un} \text{ (cm c}^{-2}\text{)}$	$\lambda \text{ (cm}^{-2}\text{)}$
$(G \cdot \hbar \cdot m^3 \cdot e \cdot c^5) / (e^6 \cdot \sqrt{2})$ $7.42 \cdot 10^{-8}$	$\hbar^2 \cdot G^2 \cdot m_e^6 \cdot c^6 / e^{12}$ $1.36 \cdot 10^{-56}$
$N_{Un} \text{ (k}^3\text{)}$	k
$2 \sqrt{2} \cdot e^{12} / (G^3 \cdot \hbar^3 \cdot m_e^6 \cdot c^3)$ $0.80 \cdot 10^{122}$	$\sqrt{2} \cdot e^4 / (G \cdot \hbar \cdot m_e^2 \cdot c)$ $4.30 \cdot 10^{40}$
$m_{PV} \text{ (g)}$	$\rho_{PV} \text{ (g cm}^3\text{)}$
$\hbar^2 \cdot G \cdot m_3 e \cdot c^2 / 2e^6$ $2.05 \cdot 10^{-66}$	$(3G \cdot \hbar^2 \cdot m_e^6 \cdot c^8) / 8\pi \cdot e^{12}$ $2.19 \cdot 10^{-29}$
$t_{PV} \text{ (s)}$	$q_{vir} \text{ (e.s.u.)}$
$e^2 / m_e \cdot c^3$ $0.94 \cdot 10^{-23}$	$\hbar \cdot G^{1/2} \cdot m_e \cdot c / \sqrt{2} \cdot e^2$ $2.28 \cdot 10^{-29}$
$q_{res,grav} \text{ (e.s.u.)}$	α
$\hbar^2 \cdot G^{3/2} \cdot m_e^3 \cdot c^2 / 2e^6$ $5.30 \cdot 10^{-70}$	$e^2 / (\hbar \cdot c)$ $7.30 \cdot 10^{-3}$

Table captions: R_{Un} – radius of curvature of the Universe; N_{Un} – number of PV cells in the Universe; M_{Un} – mass of the universe; k – “Fundamental Dirac constant”, Q_{Un} – uncompensated total charge of the Universe; m_{PV} – PV cell mass; H_0 – Hubble constant, ρ_{PV} – average density of the Universe; a_{Un} – acceleration of the expansion of the Universe; t_{PV} – time of transformation of virtual electrons and positrons; λ – term, q_{vir} – virtual charge of the PV cell; q_{res} residual uncompensated charge of the PV cell.

As already noted, Dirac spoke about the possible dependence of world constants on time. Unfortunately, he was unable to determine exactly how the constants change over time. We have derived these dependencies.

11. Predictions of the proposed concept

The proposed model of the World makes it possible to predict a number of provisions regarding its physical parameters and their changes over time. Let us consider the main predictions of the proposed model. These primarily include:

1. The presence of quantization of the PV with the energy value of the virtual element of the PV: $E_\lambda = \sqrt{\lambda} \cdot (\hbar/2) \cdot c = H \cdot \hbar / \sqrt{2} = 1.85 \cdot 10^{-45}$ erg.

2. The Universe is expanding, maintaining a similarity to itself at every moment of time.

3. Physical characteristics and laws are the same everywhere in the Universe in accordance with the “Main Cosmological Principle”.

4. The PV of the Universe consists of $N_{Un} = 0.80 \cdot 10^{122}$.

5. Each microscopic PV cell has the following parameters: dynamic virtual mass $m_{pv} = 2.05 \cdot 10^{-66}$ g, radius of curvature $r_e = 2.82 \cdot 10^{-13}$ cm, compensated virtual charge $q_{vir} = 2.28 \cdot 10^{-29}$ e. s. u., uncompensated (residual) virtual charge $q_{res} = q_{res} = 5.30 \cdot 10^{-70}$ e. s. u.

6. The Universe is expanding with acceleration $a_{Un, acc} \equiv a_\lambda$ (Table 4) under the influence of the forces of the λ -term:

$$a_\lambda = a_{Un} = \sqrt{\lambda} \cdot c^2 / \sqrt{2} = H_0 \cdot c = 7.42 \cdot 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}. \quad (56)$$

7. The Universe is characterized by a number of time-invariant global constants, such as the Hubble constant $H_0 = 2.48 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} = 76.41 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, “Fundamental Dirac constant” $k = 4.30 \cdot 10^{40}$ and microscopic constants m_e, m_{pv}, t_{pv} .

8. The PV serves as a medium for the propagation of electromagnetic radiation; its speed, in accordance with the scale factor, changes by 2.1 cm s^{-1} per year.

9. The presence of curvature of the Universe leads to the appearance of a global virtual charge of the Universe $Q_{Un, acc} = 4.21 \cdot 10^{52}$ e.s.u., what causes the observed accelerated expansion $a_{Un} = 7.42 \cdot 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$.

10. There is another similar component of the residual uncompensated charge of the Universe, which is responsible for the braking (“gravitational”) effect of the Anti-World $q_{res, grav} = 5.30 \cdot 10^{-70}$ e.s.u.

11. The exact values of other macroscopic parameters of the Universe related to its spherical metric were obtained: global average density $\rho_{Un} = 2\rho_{cr} = 2.20 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$, radius of curvature of the Universe $R_{Un} = 1.21 \cdot 10^{28} \text{ cm}$, mass of the Universe $M_{Un} = 1.63 \cdot 10^{56} \text{ g}$.

12. An expression for the gravitational constant G is obtained in terms of the microscopic parameters of the PV:

$$G = Q_{Un, grav}^2 / M_{Un}^2 = (4.22 \cdot 10^{52})^2 / (1.63 \cdot 10^{56})^2 = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ cm c}^{-2}, \quad (57)$$

$$G = q_{\text{res,grav}}^2 / m_{\text{PV}}^2 = (28.05 \cdot 10^{-140})^2 / (4.20 \cdot 10^{-132})^2 = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ cm c}^{-2}. \quad (58)$$

13. An expression for the speed of light in terms of microscopic quantities is obtained $c = r_e \cdot t_{\text{PV}}^{-1}$.

Thus, the macroscopic “constants” G and c can be expressed in terms of microscopic quantities. The expression for $G = q_{\text{res}}^2 / m_{\text{PV}}^2$ shows that the gravitational interaction of the PV is a consequence of virtual electrical forces and cannot be considered as an independent interaction. Finally, a very important conclusion is made: in the structure of the PV, there is a world time based on a microscopic constant t_{PV} , unchanged over time.

The most important note about the possibility of measuring changes in the speed of light by approximately 2 cm s^{-1} per year. The speed of light is defined as the ratio of the distance traveled to the time interval during which electromagnetic radiation travels this distance. In any case, there are time intervals in these processes. How do we measure time intervals? As in the case of determining the length standard, this is done by calculating the frequencies created by certain energy transitions in the lines. What happens to these energy transitions in electrically neutral atoms in the expanding Universe? To answer this question, it is necessary to determine the areas of influence of gravitational forces and the forces of action of the λ -term in atoms.

It should be remembered that according to the “Main Cosmological Principle”, physical laws apply equally everywhere, at any point in the Universe. In the considered closed Universe with spherical symmetry, expanding like itself, the cosmological acceleration (acceleration caused by the action of the λ -term) is the same at any point in the Universe. Gravitational acceleration depends on the specific distribution of masses in the Universe. Let us write down the condition under which the cosmological acceleration $\sqrt{(\lambda/2)} \cdot c^2 = c \cdot H_0$ exceeds the gravitational acceleration $G \cdot M/R^2$:

$$R \geq [(G \cdot M) / (c \cdot H_0)]^{1/2}. \quad (59)$$

In other words, any gravitational formation with mass M , located at a distance greater than R from the center of mass, loses its gravitational connection with this formation. With a further increase in R , control of the dynamics of structures passes to the λ -term, which causes acceleration a_λ . This is a new fundamental conclusion.

So let us look at what happens inside atoms. Substituting the parameters of the hydrogen atom into (59), we obtain the radius of action of gravitational forces $r \leq 1.2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}$, which is significantly larger than r_e . Thus, the hydrogen atom is not a stable formation and expands under the influence of the forces

of the λ -term. The dimensions of its electronic shells increase in proportion to the scale factor. It also follows that the energy of atomic transitions increases accordingly.

The basic dispersion relation will now look like this: wavelength $\lambda = c/v = \text{const.}$, assuming that both c and v depend on the scale factor in the same way. Accordingly, the wavelength λ emitted by the same atom remains constant as the Universe expands. Now it is clear that in this situation you cannot measure the change in the speed of light using frequency standards as time standards. **It is necessary to look for completely new methods for determining the speed of light, different from using frequency standards and measuring the wavelength of radiation (since the wavelength is constant).**

For the Universe as a whole, the relationship between the action of gravity and the λ -term will look like this: $R \leq 1.21 \cdot 10^{28} \text{ sm} \equiv R_{\text{Un}}$ (59). The exact coincidence of expression (59) with the radius of curvature of the Universe R_{Un} is quite natural and means that we live inside a black hole called our Universe.

Let us note one important circumstance in this regard. If the concept of World Order under consideration is correct, then we are unlikely to be able to penetrate into any other World or a remote part of our World. When trying to do this, our body will need to be disassembled into elementary particles. Each will then be transported through a microscopic black hole. After this, everything will need to be put back together. Agree – this is an attempt with an unpredictable result.

Science fiction writers should pay attention to the following important fact. If a quantized PV medium exists everywhere, then such a medium should also be present inside supermassive black holes. In addition, if this is so, then the average density of matter inside a supermassive black hole with mass $M = 10^{10} M_{\odot}$ will be $\rho \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$, which is several times less than the density of air at the Earth's surface. Instead of seeking refuge on other planets in the future, when conditions for life on Earth become unfavorable, it is better to direct the search for the necessary conditions for life inside a suitable black hole. To do this, we need to choose a black hole with a mass slightly less than $M = 10^{10} M_{\odot}$.

However, seriously, the ideology of PV quantization, firstly, can remove the question of the presence of a singularity at the center of a black hole. The volume of the PV inside the black hole is, as it were, in a "gravitational trap." This is an effective way to block the exit of PV matter outside the black hole. On the other hand, the volumes of PV cells are constantly increasing due to the volume of the additional dimension. There is a direct analogy here with our Universe, within which there is no singularity. If we also remember that the elasticity of the PV elements is many orders of magnitude higher than that of steel, then this can explain why gravitational forces should not significantly compress the PV cells.

Can stellar-mass or larger black holes exist inside supermassive black holes? There is probably no contradiction for this. It is quite possible to imagine the existence of a separate Universe inside a supermassive black hole, about which we cannot say anything due to the lack of any connection with it. Nevertheless, we are quite capable of imagining a Universe with black holes, stars, gas and even dust. Only the sizes of such universes will be many orders of magnitude smaller than our Universe.

In light of the above, the following can be noted. According to the expression for the radius of a black hole, $R = GM/c^2$ (when viewed from the inside, not the outside). Its radius increases in proportion to the scale factor due to the “work” of microscopic PV cells inside the black hole and further increases due to the mass of matter entering the black hole from the outside. Thus, a black hole behaves in the same way as the Universe as a whole, except that no real matter enters our Universe from the additional fourth spatial dimension, except space itself. On the other hand, less massive black holes, stars and other matter filling the Universe can replenish a supermassive black hole. There is only one important point. The matter of the universe can only fall into a black hole from a very limited area around it. The λ -term is again to blame for this. In accordance with formula (59), this region is limited by the distance $R \leq 1,5$ kpc, which is an insignificant fraction of the volume of the entire Universe. For example, for a galaxy like ours, the volume of matter that the black hole “feeds” is a tiny fraction of the volume of the Universe. It becomes clear why black holes in the centers of galaxies have masses much less than a percent of the mass of the parent galaxy.

In conclusion, I would like to note the following. Observational data indicate that the Universe contains about 4 percent baryonic matter, assuming that we live in a World with an average matter density $\rho = \rho_{cr}$. **If we admit that we live in a World with spherical symmetry with an average density $\rho = 2\rho_{cr}$, then we should assume that baryonic matter makes up 2 percent of the total mass of the Universe. In any concept of the structure of the Universe, two components of matter will unconditionally be present: baryonic and matter, with which the concept of “dark energy” is associated.**

In the next article, we will present observational data indicating that we still live in a closed Universe with spherical symmetry. Evidence will be presented that the matter component “dark matter” is not a necessary component of the matter of the Universe. As is known, the basis for including “dark matter” in the consideration was the following basic provisions:

1. “Dark matter” is necessary to create a potential “hole” during the formation of primary structures in the Universe.

2. It is also necessary to stabilize the dynamics of galaxy clusters.

3. Its necessity is associated with the explanation of the rotation curves of galaxies.

All these problems look completely different in a Universe with spherical symmetry.

12. Conclusion

1. The concept of Universe based on the hypothesis of physical vacuum quantization (PV) is proposed. The PV represents volume of space-time containing N_{Un} cells of e-p pairs, having the size of the classical electron radius r_e , energy $\sqrt{\lambda} \cdot (\hbar/2) \cdot c$ and being in a state of hyper-frequency oscillations.

2. We live in a universe with spherical symmetry, where 98% of matter is the so-called "dark energy" and 2% – hadronic matter. The presence of "dark matter" in the Universe is not required.

3. All physical characteristics of Universe are derived from five world "constant", four of which are not such, but depend on time (epoch). The law of change of four constants with time is precisely established, so that the physical characteristics of the Universe are known at any moment of time with an accuracy determined by the specified five constants.

4. The time interval of hyper frequency transformations of virtual electron-positron pairs "e-p" into PV is a universal global constant $t_{\text{PV}} \approx 0.9 \cdot 10^{-23}$ s. The t_{PV} value is constant with respect to the other four global variables that change over time.

5. Another universal global constant H_0 , which is constant in time, together with the Dirac constant k , form the fundamental basis of the structure of the Universe, providing a self-similar accelerated expansion of the Universe.

6. Dark energy obeys a single interaction: virtual-electrical. Gravitational interaction in the PV is a consequence of the presence of part of the uncompensated virtual electric charge arising due to the spherical geometry of space-time. This interaction is a reaction of the Anti-World, when PV cells, in the process of hyper-frequency oscillations, are pressed into the space of the Anti-World, which is inferior in volume to the space of the World. In this case, a slight deformation of e-p-pairs occurs at a level of 10^{-40} of their volume. This process occurs in each of the $N_{\text{Un}} \approx 10^{122}$ PV cells and is observed by us as gravity in the PV.

7. The quantum temperature of the PV of the Universe $T_{\text{Un}} \approx 10^{-29}$ K is a constant value in time. Consequently, the Universe is a closed black hole, which does not radiate energy, both inside itself and outward, into an additional dimension.

8. The Universe could have arisen from quantum fluctuations in the fifth extra dimension in which it is located. The magnitude of quantum fluctuations $E_{\text{fluct}} = m \cdot c^2$ can be arbitrarily small if we take into account that the speed of light c at this time is just as small squared.

References

- [1] G. Clifford, "On the space theory of matter", *Nature*, vol. 6, pp. 14–17, 1873.
- [2] G. Wale, *Was ist matter*, Berlin : Springer, 1924.
- [3] J. A. Wheeler, "Space topology," *Phys. Rev.*, vol. 97, pp. 511–536, 1955, doi: 10.1103/physrev.97.511.
- [4] C. W. Misner and J. A. Wheeler, "Electrical charge," *Ann. Phys.*, vol. 2, pp. 525–603, 1957.
- [5] A. N. Vyaltsev, *Discrete space-time*. Moscow : Nauka, 1965. (In Russ.).
- [6] Ya. B. Zeldovich and I. D. Novikov, *Relativistic astrophysics*. Moscow : Nauka, 1967. (In Russ.).
- [7] M. G. Larionov, "Coordinate-time transformations." In : *Astrophysics at the turn of the century*. Moscow : YANUS-K, pp. 533–534, 2001. (In Russ.).
- [8] M. G. Larionov, "Dark energy – a virtual form of existence of matter?" In : *All-Russian astronomical conf. VAK-2004 "Horizons of the Universe"* (June 3–10, 2004), pp. 192–195. Moscow : 2004. (In Russ.).
- [9] M. G. Larionov, Possible quantum character of dark energy. In : *Gamow conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of George Gamow "Astrophysics and cosmology after Gamow – theory and observations"* (Odessa, Aug. 8–14, 2004). 2004. pp. 35–39. (In Russ.).
- [10] M. G. Larionov, "Distribution of radio sources and the era of formation of large-scale structures," *Astronomy Letters*, vol. 24, iss. 1, pp. 1–6, 1998.
- [11] M. G. Larionov, "A Friedmann–Lemaître Universe Model with a Positive Cosmological Constant," *Astrophysics and Space Science*, vol. 252, pp. 139–149, 1997, doi: 10.1023/A:1000818316842.
- [12] M. G. Larionov, "Dark energy. Physical basis and evolutionary characteristics." In : *All-Russian Astronomical. conf. VAK-2010 "From the era of Galileo to the present day"* (Nizhny Arkhyz, Sept. 12–19, 2010), pp. 116–119, 2010. (In Russ.).
- [13] M. G. Larionov, "Relationship between the Hubble constant and world constants," *Radio-physics and Radio Astronomy*, vol. 13, no. 3, pp. 811–816, 2008.
- [14] K. R. Lang, *Astrophysical formulae*. Berlin : Springer-Verlag, 1974.
- [15] M. Rauch, J. Miralda-Escude, W. L. W. Sargent et al. "The Opacity of the Ly α Forest and Implications for Ω_b and the Ionizing Background," *The Astrophysical Journal*, vol. 489, no. 1, pp. 7–20, 1997, doi: 10.1086/304765.

Information about the author

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Chief Researcher of the Astro Space Center, Moscow, Russian Federation.

УДК 524.8

Физические свойства материи, связанной с понятием «темная энергия»

Ларионов М. Г.

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН
Профсоюзная, д. 84/32, г. Москва, ГСП-7, 117997, Российская Федерация
mgl-mikhail@yandex.ru

Получено: 10 апреля 2024 г.

Отрецензировано: 15 апреля 2024 г.

Принято к публикации: 15 апреля 2024 г.

Аннотация: Структура нашего Мира основана на гипотезе существования «темной энергии», которая представляет собой виртуально квантованное состояние физического вакуума (ФВ). Вселенная наполнена около 10^{122} плотно упакованных ячеек ФВ. Каждая ячейка представляет собой объем «пространства-времени», включающий в себя электронно-позитронную (e-p) виртуальную пару с энергией $\sqrt{\lambda}(\hbar/2)c = 1,85 \cdot 10^{-45}$ эрг. Физические параметры Вселенной получены через 5 микроскопических и макроскопических констант: массы электрона m_e , заряда электрона e , гравитационной постоянной G , скорости света c и постоянной Планка $\hbar$. Макроскопические параметры Вселенной включают в себя постоянную Хаббла $H_0 \approx 2,5 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$, радиус кривизны Вселенной $R_0 \approx 1,2 \cdot 10^{28}$ см, ее электрический заряд $Q_{Un} \approx 10^{52}$ CGSE (e. s. u). Квантуемая лептонная компонента материи Вселенной — «темная энергия» служит средой для распространения электромагнитного излучения. Микроскопические параметры Вселенной включают физические характеристики ячеек ФВ, состоящих из виртуальных e-p пар. К ним относятся масса ячейки ФВ $m_{pV} \approx 10^{-66}$ г, время нахождения в состоянии виртуального электрона и позитрона $t_{pV} \approx 10^{-23}$ с, виртуальный заряд $q_{vir} \approx 10^{-29}$ e. s. u, остаточный виртуальный заряд $q_{vir,res} \approx 10^{-70}$ e. s. u. Рассмотрена принципиальная возможность исключения из состава материи Вселенной «темной материи». Полученные данные использованы для исследования эволюционных характеристик Вселенной. Получено точное выражение для Фундаментальной константы Дирака.

Ключевые слова: космология, «темная материя», «темная энергия», эволюция Вселенной.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Larionov M. G. Physical Properties of the Matter Associated with the Concept “Dark Energy” // Infocommunications and Radio Technologies. 2024. Vol. 7, no. 1. P. 1–32.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Larionov, M. G. Physical Properties of the Matter Associated with the Concept “Dark Energy” / M. G. Larionov // Infocommunications and Radio Technologies. – 2024. – Vol. 7, no. 1. – P. 1–32.

Список литературы

1. Clifford G. On the space theory of matter // *Nature*. 1873. Vol. 6. P. 14–17.
2. Wale G. Was ist matter. Berlin : Springer, 1924. 88 p.
3. Wheeler J. A. Space topology // *Phys. Rev.* 1955. Vol. 97. P. 511–536.
4. Misner C. W., Wheeler J. A. Electrical charge // *Ann. Phys.* 1957. Vol. 2. P. 525–603.
5. Вьяльцев А. Н. Дискретное пространство-время. М. : Наука, 1965. 400 с.
6. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Релятивистская астрофизика. М. : Наука, 1967. 654 с.
7. Ларионов М. Г. Координатно-временные преобразования. В кн. : *Астрофизика на рубеже веков*. М. : ЯНУС-К, 2001. С. 533–534.
8. Ларионов М. Г. Темная энергия — виртуальная форма существования материи? В кн. : *Тез. д-дов Всеросс. астрономич. конф. ВАК-2004 «Горизонты Вселенной» (МГУ, ГАИШ, 3—10 июня 2004 г.)*. М. : 2004. С. 192—195.
9. Ларионов М. Г. Возможный квантовый характер темной энергии. В кн. : *Гамовская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Георгия Гамова «Астрофизика и космология после Гамова — теория и наблюдения» (Одесса, 8—14 авг. 2004 г.)*. 2004. С. 35—39.
10. Larionov M. G. Distribution of radio sources and the era of formation of large-scale structures // *Astronomy Letters*. 1998. Vol. 24, no. 1. P. 1–6.
11. Larionov M. G. A Friedmann–Lemaître Universe Model with a Positive Cosmological Constant // *Astrophysics and Space Science*. 1997. Vol. 252. P. 139–149.
12. Ларионов М. Г. Темная энергия. Физические основы и эволюционные характеристики. В кн. : *Тез. д-дов Всероссийской астрономич. конф. ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней» (Нижний Архыз, 12—19 сент. 2010 г.)*. 2010. С. 116—119.
13. Larionov M. G. Relationship between the Hubble constant and world constants // *Radio-physics and Radio Astronomy*. 2008. Vol. 13, no. 3. P. 811–816.
14. Lang K. R. *Astrophysical formulae*. Berlin : Springer-Verlag, 1974. 735 p.
15. Rauch M., Miralda-Escude J., Sargent W. L. W. et al. The Opacity of the Ly α Forest and Implications for Ω_b and the Ionizing Background // *The Astrophysical Journal*. 1997. Vol. 489, no 1. P. 7–20.

Информация об авторе

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация.

УДК 550.343

О различии свойств статистики измерений магнитного поля для географически разнесенных магнитометров перед землетрясением 6 февраля 2024 года в восточной части Турции

^{1,2} Коган Л. П., ¹ Вольвач А. Е., ¹ Вольвач Л. Н.,

³ Бубукин И. Т., ² Штернберг В. Б.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория РАН
Ялта, 298688, Российская Федерация

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
Нижегород, 603000, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский радиофизический институт,
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Нижегород, 603950, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Получено: 12 мая 2024 г.

Отрецензировано: 15 мая 2024 г.

Принято к публикации: 15 мая 2024 г.

Аннотация: Исследовано изменение свойств статистики измерений Z -составляющей магнитного поля Земли перед землетрясением высокой магнитуды, которое произошло 6 февраля 2023 года на востоке Турции. Проведено сопоставление свойств статистического функционала, построенного по измерениям магнитного поля для шести географически удаленных магнитометров, находящихся на существенно отличающихся направлениях по отношению к точке эпицентра указанного события. Выявлена закономерность, связывающая направление на точку будущего эпицентра и вариации значений полученных статистических зависимостей как функций времени.

Ключевые слова: Земля, магнитное поле, землетрясение, точка эпицентра, Турция.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): О различии свойств статистики измерений магнитного поля для географически разнесенных магнитометров перед землетрясением 6 февраля 2024 года в восточной части Турции / Л. П. Коган, А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 33—44.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): О различии свойств статистики изменений магнитного поля для географически разнесенных магнитометров перед землетрясением 6 февраля 2024 года в восточной части Турции / Л. П. Коган, А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 33—44.

1. Введение

Проблема прогнозирования землетрясений заключается в их сложной и непредсказуемой природе. Научные методы предсказания землетрясений все еще находятся в стадии разработки, и нет полной гарантии точности предсказаний. В настоящее время большинство усилий направлено на раннее предупреждение и меры обеспечения безопасности в случае возникновения землетрясений.

Для России прогнозирование землетрясений также имеет большое значение, особенно учитывая ее географическое положение и наличие зон с высоким сейсмическим риском, таких как Дальний Восток и Кавказ. Особенно если учесть, что около трети населения Российской Федерации проживает в сейсмоопасных районах, где созданы и эксплуатируются атомные электростанции и другие промышленные предприятия. Эффективное предсказание и подготовка к землетрясениям могут существенно снизить потенциальные ущербы и спасти жизни.

Зоны подготовки к землетрясениям (зоны с высоким сейсмическим риском) могут находиться в различных регионах мира. Некоторые из них включают Кольцо огня в Тихом океане, южные штаты США, Японию, Турцию, Италию, Иран, Индонезию и другие. В России такие зоны находятся в Дальневосточном и Кавказском регионах.

Сейсмoeлектромагнитные явления — это электромагнитные сигналы, которые возникают в результате сейсмической активности, такой как землетрясения или вулканическая деятельность. Эти явления включают в себя изменения электрических и магнитных полей, а также появление электрических токов в земной коре. Исследования в этой области проводятся с целью понять связь между сейсмической активностью и электромагнитными сигналами, что может помочь в развитии методов прогнозирования землетрясений.

В данной статье на основании подхода [1—7] исследуются свойства статистического функционала от совокупности измерений Z -компоненты геомагнитного поля, проведенных с 22 января по 6 февраля 2024 года. Рассматриваются свойства совокупности данных, полученных на шести магнитовариационных станциях, расположенных Турции, Австрии, Крыму, Северном Кавказе, Армении и Греции (соответственно магнитометры

IZN, WIC, SIM, BAK, GLK и PEG). Целью настоящей работы является поиск алгоритма определения точки эпицентра приближающегося землетрясения высокой магнитуды.

2. Наблюдения и обработка

Будем полагать, что любое физическое или биофизическое поле $x(t)$, измерения которого проводятся в регионах с повышенной сейсмической активностью, может быть записано в виде следующей суммы:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t). \quad (1)$$

Здесь случайная величина (СВ) $x_1(t)$ является фоновым шумом, который создается ансамблем обычно наблюдаемых случайных процессов, в том числе шумом самой измерительной аппаратуры, тогда как случайное составляющее $x_2(t)$ считаем связанным с влиянием интенсивных явлений разлома литосферных плит в зоне будущего гипоцентра во время «итоговой подготовки» приближающегося землетрясения. Указанный термин относится к процессам, которые происходят в последние три—пять суток перед сейсмическим событием. По аналогии с [1—7] в роли главной гипотезы в этой статье принимается предположение о статистической независимости (или слабой зависимости) двух этих случайных слагаемых.

Для плотности вероятности $\rho_x(w)$ для суммы (1) двух независимых случайных величин имеет место представление в виде следующей свертки:

$$\rho_x(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{x_1}(w') \rho_{x_2}(w - w') dw'. \quad (2)$$

Поскольку число измерений конечно, то плотность вероятности фонового шума $\rho_{x_1}(w)$ будет включать в себя мелкомасштабные случайные флуктуации, свои для каждого отрезка реализации. Несложно понять, что если ширина вероятностного распределения $\rho_{x_2}(w)$ хотя бы в несколько раз превосходит период таких флуктуаций зависимости $\rho_{x_1}(w)$, то в результате выполнения интегрирования вида (2) произойдет усреднение этих мелкомасштабных возмущений, следствием чего станет уменьшение их амплитуды, понимаемой как величина эффективного отклонения от нулевого уровня соответствующих флуктуаций. Это означает, что существование в (1) независимого случайного слагаемого $x_2(t)$ приводит к эффекту «естественной регуляризации» свойств статистики рассматриваемых измерений. Такое изменение амплитуды данных флуктуаций при появлении в системе «дополнительного» независимого случайного слагаемого вполне

может быть выявлено, в частности, с помощью математических методов наподобие преобразования Фурье.

С целью выявления указанного изменения проведем разделение интервала наблюдений на отдельные отрезки реализации. Как и в [1—7], для каждого подобного отрезка мы приходим к выводу, что появление в (1) слагаемого $x_2(t)$, связанного с подготовкой надвигающегося землетрясения, со статистически значимой вероятностью способно привести к существенному изменению величины и в целом свойств функционала вида

$$L(n) = \frac{A}{M} \sum_{l=n-M+1}^n |\mathcal{L}_l|, \quad \mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}. \quad (3)$$

В (3) аргумент n соответствует моменту времени завершения отрезка реализации с этим номером, коэффициент A введен для перехода к удобной для анализа области значений зависимости $L(n)$, величина M определяет ширину интервала усреднения по совокупности из M последовательных отрезков реализации, сомножитель $P_{m,l}$ в формуле (3) равен вероятности попадания значений функции $\sin[x(t)]$ для отрезка реализации номер l в i -й интервал области значений вида

$$\sin[x(t)]_{\min} + mh \leq \sin[x(t)] < \sin[x(t)]_{\min} + (m+1)h, \quad (4) \\ 0 \leq m \leq N-1.$$

Здесь множитель $h = 0.1$ — ширина интервала дискретизации, общее число которых составляет $N = 2/h = 20$. Статистика (4) строится по совокупности измерений Z -компоненты измеряемого геомагнитного поля. Переход вместо непосредственно измеряемых значений $x(t)$ к рассмотрению случайной величины $\sin[x(t)]$ связан с существованием интегрируемых особенностей соответствующей плотности вероятности вида

$$\rho_{\sin[x]}(w) \sim (1 - w^2)^{-1/2} \text{ при } w \rightarrow \pm 1.$$

Из проведенных вычислений следует, что их влияние приведет к усилению различия (вблизи точек $w \rightarrow -1$ и $w \rightarrow 1$) значений амплитуды рассматриваемых мелкомасштабных флуктуаций для тех отрезков реализации, для которых достаточно велико независимое слагаемое $x_2(t)$ по сравнению с отрезками, для которых оно относительно мало или отсутствует.

Отметим также, что принцип действия предлагаемой методики фактически состоит в оценке степени равномерности вероятностного распределения на малых интервалах области значений измеряемого сигнала. Это означает, что статистический функционал $L(n)$ характеризует уровень ха-

оса и, следовательно, величину энтропии для измеряемого физического поля. При этом увеличение и, наоборот, уменьшение эффективной области значений случайного процесса $x_2(t)$ с высокой вероятностью приводит к убыванию и, соответственно, возрастанию значений функционала $L(n)$. Другими словами, при увеличении сдвигания литосферных плит на этапе «итоговой подготовки» приближающегося землетрясения с существенной вероятностью будет иметь место уменьшение, а при локальном ослаблении таких процессов (которое может быть связано, в числе прочего, с ослаблением механической прочности блоков земной коры из-за новых сетей разломов) — увеличение значений функционала $L(n)$.

Принципиально важным является вывод о том, что перед сильными землетрясениями такой процесс с достаточно высокой вероятностью одновременно будет происходить в разных, в том числе удаленных вплоть до тысячи и более километров от точки будущего эпицентра географических районах. Далее это утверждение верифицируется по данным измерений Z -компоненты геомагнитного поля для шести магнитовариационных станций, расположенных в Турции, Австрии, Крыму, Северном Кавказе, Армении и Греции (соответственно магнитометры *IZN*, *WIC*, *SIM*, *BAK*, *GLK* и *PEG*).

Отметим, что указанная Z -составляющая магнитного поля была выбрана по той причине, что близкие к горизонтальным направления разломов в области будущего гипоцентра в общем случае являются маловероятными. Как несложно понять, отсюда следует вывод о квазигоризонтальном направлении токов, возникающих между краями новых сетей разломов в зоне подготовки предстоящего землетрясения. Последнее означает, что на локальных, радиусом порядка одной-двух тысяч километров областей поверхности Земли (а именно на таком участке расположены рассматриваемые магнитометры) горизонтальные компоненты магнитного поля, создаваемого указанными токами, в общем случае будут существенно слабее вертикальных.

3. Результаты

На рис. 1 показано расположение эпицентров рассматриваемого землетрясения магнитудой 7,8, начало которого имело место 6 февраля года в 01:17:35 UTC в южной части Турции, а также последовавшего через 9 часов сильного афтершока с почти такой же магнитудой 7,5. Сплошными красными кружками отмечены места расположения магнитометров *IZN*, *WIC*, *SIM*, *GLK*, *PEG* и *BAK*, а звездочками — эпицентры данного события.



Рис. 1. Расположение эпицентра землетрясения, шести рассматриваемых магнитовариационных станций, а также направлений от эпицентра на магнитометры BAK и IZN (желтые пунктирные прямые *a* и *b*).

Fig. 1. Location of the earthquake epicenter, the six magnetovariation stations under consideration, as well as the directions from the epicenter to magnetometers BAK and IZN (yellow dotted lines *a* and *b*)

На рис. 2 приведены зависимости $L(n)$, соответствующие измерениям Z -компоненты геомагнитного поля на магнитометрах IZN, BAK, WIC, SIM, GLK и PEG (кривые 1, 2, 3, 4, 5 и соответственно 6) в указанный период времени. Здесь в (3) коэффициент $A = 1000$, горизонтальная ось отвечает времени в часах, начиная с 00:00:00 22 января и заканчивая 23:59:59 6 февраля 2023 года. Каждая точка зависимости $L(n)$ соответствует усреднению по $M = 300$ отрезкам реализации для 150 измерений магнитного поля в каждом. Таким образом, любая точка кривой $L(n)$ отвечает 45000 последовательным измерениям соответствующей компоненты магнитного поля. Момент начала землетрясения отмечен вертикальной сплошной красной линией.

На рис. 2а приведены кривые $L(n)$ для всех шести указанных магнитовариационных станций, а на рис. 2б, с целью большей наглядности — только для магнитометров IZN и BAK (кривые 1 и 2). Эти две зависимости выделяются из общего ансамбля тем, что кривой 1 для станции IZN на рис. 2а соответствуют наиболее глубокие минимумы, тогда как зависимость 2 для магнитометра BAK расположена существенно выше всех остальных пяти указанных кривых.

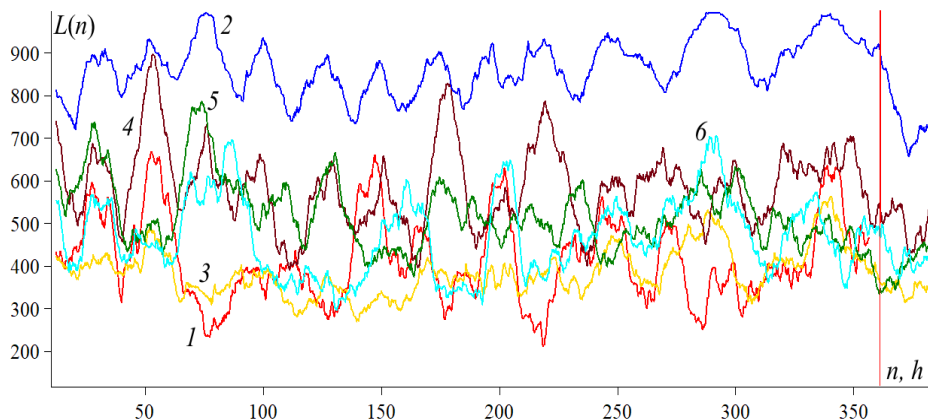


Рис. 2а. Зависимости $L(n)$ для измерений Z-компоненты геомагнитного поля по данным магнитометров IZN, BAK, SIM, WIC, GLK и PEG (красная, синяя, желтая, бордовая, зеленая и лазурная кривые 1, 2, 3, 4, 5 и соответственно 6).

Fig. 2a. Dependences of $L(n)$ for measurements of the Z-component of the geomagnetic field according to magnetometers IZN, BAK, SIM, WIC, GLK and PEG (red, blue, yellow, burgundy, green and azure curves 1, 2, 3, 4, 5 and respectively 6)

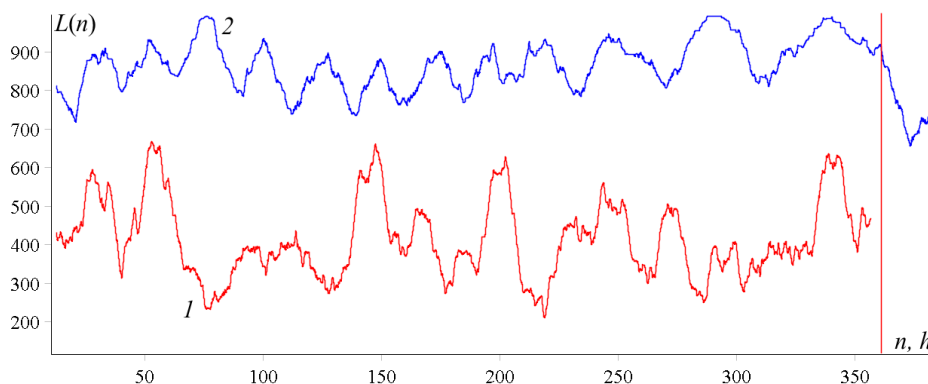


Fig. 2б. Зависимости $L(n)$ для измерений Z-компоненты геомагнитного поля по данным магнитометров IZN и BAK (красная и синяя кривые 1 и соответственно 2).

Fig. 2b. Dependences of $L(n)$ for measurements of the Z-component of the geomagnetic field according to data from IZN and BAK magnetometers (red and blue curves 1 and 2, respectively)

4. Дискуссия и выводы

При анализе рис. 1 и 2 приходим к следующим выводам. С учетом рассмотренного выше статистического смысла функционала $L(n)$, значения которого с высокой вероятностью убывают при возрастании незави-

симого слагаемого $x_2(t)$ в (1), этот факт позволяет говорить о намного большем уровне воздействия процесса подготовки землетрясения на турецкую станцию *IZN* по сравнению с российской *BAK*. При этом из анализа рис. 1 следует, что области относительно малых значений $x_2(t)$, в которой оказалась станция *BAK*, отвечает весьма малый угловой диапазон, отсчитываемый от направления на точку будущего эпицентра, поскольку измерениям географически близких к *BAK* станций *SIM* и *GLK* соответствуют существенно меньшие по значениям кривые $L(n)$. Согласно проведенным выше расчетам этот факт может быть интерпретирован как существенно большие значения $x_2(t)$, содержащиеся в измерениях магнитного поля на магнитовариационных станциях *SIM* и *GLK*.

Отметим, что, согласно теореме Био — Савара — Лапласа, магнитное поле $\vec{B}$ от токов, протекающих между краями вновь образуемых разломов в области будущего гипоцентра на этапе «итоговой подготовки» предстоящего события, является по модулю прямо пропорциональным соотношению

$$B \sim \frac{\sin(\alpha)}{R^2}, \quad (5)$$

где α — угол между эффективным направлением тока и направлением на точку наблюдения, R — расстояние от нее до эпицентра. Здесь введено предположение, что процессы формирования основных новых сетей трещин и разломов сосредоточены в области, размеры которой существенно меньше расстояния от будущего эпицентра до любого из рассматриваемых магнитометров. При этом, как видно из рис. 1, расстояния от эпицентра землетрясения до станций *IZN* и *BAK* (а также *SIM* и *GLK*) вполне сопоставимы. Поэтому указанное различие свойств кривых 1 и 2 на рис. 2 может быть объяснено только существенным отличием значений числителя $\sin(\alpha)$ в соотношении (5).

Такое отличие означает, что указанные выше токи между краями новых трещин и разломов в районе будущего гипоцентра в основном протекали в области малых углов к направлению на магнитометр *BAK*. Отсюда следует как квазиперпендикулярная ориентация этих токов к направлению на магнитометр *IZN*, так и близкое к нормали расположение основных сетей этих разломов к направлению на магнитовариационную станцию *BAK*. Направления от магнитометров *IZN* и *BAK* на точку эпицентра отмечены желтыми пунктирными прямыми a и b на рис. 1. Хорошо видно, что два этих направления почти перпендикулярны.

Таким образом, на основании проведенных расчетов может быть сформулирован способ определения локализованного района предстояще-

го сильного землетрясения. Он сводится к определению двух региональных магнитометров с максимально отличающимися значениями функционала $L(n)$ и последующего определения такой локальной географической области, для которой направления на от ее центра на точки расположения указанных магнитометров образуют прямой угол. Центр указанной области в первом приближении может рассматриваться как точка потенциального эпицентра предстоящего события.

Таким образом, в данной работе была рассмотрена совокупность статистических функционалов от измерений геомагнитного поля, проведенных в последние 15 суток перед землетрясением магнитудой 7,8 на 6 февраля 2023 года востоке Турции, а также непосредственно в день этого события. На основании анализа полученных результатов предложен алгоритм определения локальной географической области вблизи будущего эпицентра приближающегося сильного землетрясения. При условии дальнейшей верификации применительно к серии сейсмических событий высокой магнитуды рассматриваемый подход может помочь существенно продвинуться в решении проблемы определения координат предстоящих землетрясений.

Список литературы

1. Вольвач А. Е., Коган Л. П., Канониди К. Х. Способ определения вероятности возникновения землетрясений на основе выявления феноменов с высоким уровнем детерминированности. Патент 2778972 РФ, СПК G01V 1/008 (2022.08); G01V 3/38 (2022.08). № 2021122118: заявл. 26.07.2021; опубл. 29.08.2022. Бюл. № 25. 7 с.
2. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor / A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2022. Vol. 108. Art. 106200.
3. Kogan L. P., Bubukin I. T., Shtenberg V. B. To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time // Chaos, Solitons and Fractals. 2021. Vol. 145. Art. 110807.
4. A Possible Relationship between the Sets of Quasi-Linear Local Trends Statistically Detected in the Variations of the Magnetic Field Parameters before Earthquakes in Seismically Active Zones of the Black Sea, Caucasus, and Western Asia / A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al. // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. Vol. 13(5). Art. 0680.
5. Statistical precursors of a strong earthquake on April 6, 2009 on the Apennine Peninsula / A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al. // Heliyon. 2022. Vol. 8(8). Art. e10200.
6. About Statistical Precursor Earthquakes on October 12, 2021 with a Magnitude of 6.4 on the Island of Crete / A. Volvach, L. Kogan, K. Kanonidi et al. // Romanian Journal of Physics. 2023. Vol. 68. Art. 801.
7. On a comparison of the properties of a statistical functional from measurements of the magnetic field in the mid of the Russian continental platform and in a seismically active region / A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al. // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. Vol. 63. P. 224–238.

Информация об авторах

Коган Лев Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия.

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Бубукин Игорь Тимофеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

Штенберг Валерия Борисовна, кандидат физико-математических наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

On the Difference in the Properties of Magnetic Field Measurement Statistics for Geographically Displaced Magnetometers before the Earthquake of February 6, 2024 in the Eastern Part of Turkey

L. P. Kogan^{1,2}, A. E. Volvach¹, L. N. Volvach¹,
I. T. Bubukin³, and V. B. Shternberg²

¹Radio Astronomy and Geodynamics Department,
Crimean Astrophysical Observatory
Yalta, 298688, Russian Federation

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
Nizhny Novgorod, 603000 Russian Federation

³Radiophysical Research Institute of N. I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: May 12, 2024

Peer-reviewed: May 15, 2024

Accepted: May 12, 2024

Abstract: *The change in the properties of statistics of measurements of the Z-component of the Earth's magnetic field before a high-magnitude earthquake that occurred on February 6, 2023 in eastern Turkey was studied. A comparison was made of the properties of the statistical functional constructed from magnetic field measurements for six geographically distant magnetometers located in significantly different directions relative to the epicenter point of the specified event. A pattern has been identified that connects the direction to the point of the future epicenter and variations in the values of the obtained statistical dependencies as functions of time.*

Keywords: *Earth, magnetic field, earthquake, precursors, Türkiye.*

For citation (IEEE): L. P. Kogan, A. E. Volvach, L. N. Volvach et al. "On the Difference in the Properties of Magnetic Field Measurement Statistics for Geographically Displaced Magnetometers before the Earthquake of February 6, 2024 in the Eastern Part of Turkey," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 33–44, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.02. (In Russ.).

References

- [1] A. E. Volvach, L. P. Kogan, and K. Kh. Kanonidi, "A method for determining the probability of earthquakes based on identifying phenomena with a high level of determinism," RF Patent 2778972, SPK G01V 1/008 (2022.08), G01V 3/38 (2022.08), no. 2021122118, application 26.07.2021. (In Russ.).

- [2] A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al., “Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 108, art. 106200, 2022, doi: 10.1016/j.cnsns.2021.106200.
- [3] L. P. Kogan, I. T. Bubukin, and V. B. Shtenberg, “To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 145, art. 110807, 2021, doi: 10.1016/j.chaos.2021.110807.
- [4] A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al., “A Possible Relationship between the Sets of Quasi-Linear Local Trends Statistically Detected in the Variations of the Magnetic Field Parameters before Earthquakes in Seismically Active Zones of the Black Sea, Caucasus, and Western Asia,” *Geodynamics & Tectonophysics*, vol. 13(5), art. 0680, 2022, doi: 10.5800/GT-2022-13-5-0680.
- [5] A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al., “Statistical precursors of a strong earthquake on April 6, 2009 on the Apennine Peninsula,” *Heliyon*, vol. 8(8), art. e10200, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10200.
- [6] A. Volvach, L. Kogan, K. Kanonidi et al., “About Statistical Precursor Earthquakes on October 12, 2021 with a Magnitude of 6.4 on the Island of Crete,” *Romanian Journal of Physics*, vol. 68, art. 801, 2023.
- [7] A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi et al., “On a comparison of the properties of a statistical functional from measurements of the magnetic field in the mid of the Russian continental platform and in a seismically active region,” *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 63, pp. 224–238, 2023, doi: 10.1134/S0016793222600783.

Information about the authors

Lev P. Kogan, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Igor T. Bubukin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Research Institute of Radio Physics, Nizhny Novgorod State University. N. I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Valeria B. Shtenberg, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.382.323; 621.382.2/.3:004.333

Кремниевый релаксационный квантовый транзистор

Обухов И. А., Обухов И. И.

Научно-производственное предприятие «Радиотехника»

г. Москва, 119334, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, Российская Федерация

iao001@mail.ru

Получено: 19 марта 2024 г.

Отрецензировано: 1 апреля 2024 г.

Принято к публикации: 8 апреля 2024 г.

Аннотация: Теоретически исследована возможность создания кремниевого релаксационного квантового транзистора. Рассчитаны характеристики прибора и проанализирована их связь с длиной его базы. Показано, что для создания транзистора такого типа на кремнии необходимы технологии, позволяющие формировать структуры с характерными размерами один-два нанометра.

Ключевые слова: релаксационный квантовый транзистор, антимонид индия, кремний, низкоразмерные структуры, нанопровода, сверхвысокое быстродействие, сверхнизкое энергопотребление.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Обухов И. А., Обухов И. И. Кремниевый релаксационный квантовый транзистор // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 45—55.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Обухов, И. А. Кремниевый релаксационный квантовый транзистор / И. А. Обухов, И. И. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 45—55.

1. Введение

Конструкция релаксационного квантового транзистора (РКТ) была предложена в статье [1]. В работах [2, 3] было показано, что этот прибор может быть базовым элементом для цифровых схем, превышающих современные по быстродействию более чем на порядок и имеющих на порядок более низкое энергопотребление.

При расчетах характеристик РКТ в статьях [2, 3] предполагалось, что он изготовлен из антимонида индия, электроны в котором демонстрируют рекордно высокую по сравнению с другими полупроводниками по-

движность. Выбор материала был обусловлен технологическими ограничениями. Для того, чтобы транзистор обеспечивал высокий коэффициент усиления, необходимо выполнение условия [1]

$$L_b < L_{rel}, \quad (1)$$

где: L_b — длина его базы,

$$L_{rel} = (\hbar\mu_e/e)^{1/2} \quad (2)$$

— длина релаксации неравновесных электронов к термодинамическому равновесию, $\hbar$ — приведенная постоянная Планка, μ_e — подвижность электронов в области базы, e — элементарный электрический заряд.

При комнатной температуре для антимонида индия в случае объемного материала (3D структуры) $L_{rel} \approx 70$ нм; в случае двумерного электронного газа (2D структуры), основываясь на оценках подвижности, данных в работах [4, 5], — $L_{rel} \approx 40$ нм; в нанопроводах (1D структурах) при изготовлении их не на поверхности, а внутри гетероструктур, следует ожидать $L_{rel} \approx 30$ нм. Эти значения достаточно велики для того, чтобы при изготовлении прибора можно было удовлетворить условию (1), и достаточно малы для того, чтобы обеспечить предельные частоты его работы, превышающие 3 ТГц.

Для кремния, основного материала современной микроэлектроники, нетрудно получить аналогичные оценки [6]: 3D структура — $L_{rel} \approx 10$ нм, 2D структура — $L_{rel} \approx 7$ нм, 1D структура — $L_{rel} \approx 5$ нм. Для формирования областей из кремния, удовлетворяющих условию (1), необходимы уже технологии, обеспечивающие предельные на сегодня возможности. Если такие структуры удастся изготовить, то можно надеяться на такие же рабочие частоты, как и у РКТ из антимонида индия.

Кремниевые технологии являются наиболее массовыми в современной микроэлектронике. Разведанные запасы кремния на Земле в сотни тысяч раз превосходят известные запасы индия. По этим причинам представляет интерес проанализировать возможность создания и ожидаемые характеристики РКТ на основе структур из кремния.

2. Конструкция прибора

Принципиальная конструкция РКТ представлена на рис. 1. Он может быть выполнен, например, из нанопроводов, как это предлагается в работах [1—3]. В этом случае области эмиттера и коллектора являются нанопроводами с большим, чем нанопровод базы, поперечным сечением. Также эмиттером и коллектором прибора могут быть 2D или 3D структуры, а базой —

структура с меньшей квантовой размерностью. Ее задача сформировать в области базы невысокий потенциальный барьер для электронов. Высотой этого барьера определяется область рабочих напряжений прибора.

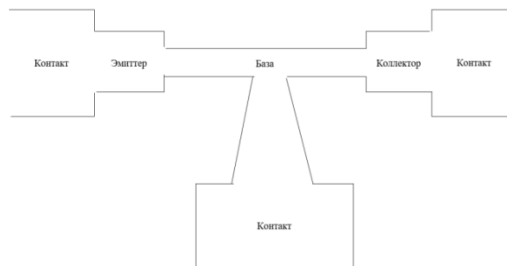


Рис. 1. Релаксационный квантовый транзистор.

Fig. 1. Relaxation quantum transistor

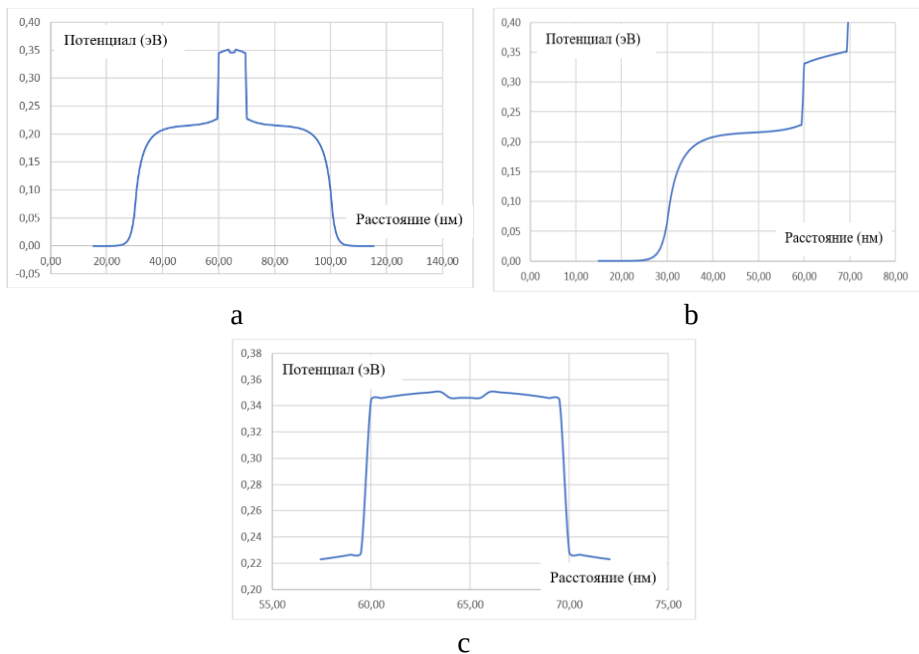


Рис. 2. Потенциальные рельефы для электронов в РКТ при нулевых приложенных напряжениях и $L_b = 10$ нм: от эмиттера до коллектора (а); от базового контакта до базы (б); в области базы по направлению от эмиттера к коллектору (с).

Fig. 2. Potential reliefs for electrons in RCT at zero applied voltages and $L_b=10$ nm: from emitter to collector (a); from base contact to base (b); in the base area in the direction from the emitter to the collector (c)

В этой работе в расчетах полагалось, что эмиттер и коллектор представляют собой 3D кремний, легированный донорами до уровня $N_{De} = N_{Dc} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а база — нанопровод квадратного сечения с площадью $S_{\perp} = 100 \text{ нм}^2$, легированный донорами до $N_{Db} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Kontakтами к эмиттеру, коллектору и базе является n^+ -кремний ($N_D = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

Нанопровод, соединяющий базовый контакт с базой, предполагается выполненным из n -кремния с уровнем легирования 10^{18} см^{-3} . Вблизи контакта он представляет собой 3D материал, а при соединении с базой — 1D провод прямоугольного сечения $2 \text{ нм} \times 10 \text{ нм}$. Длины эмиттера, коллектора и нанопровода, соединяющего базовый контакт с базой, выбраны равными 30 нм.

На рис. 2 показаны потенциальные рельефы для электронов в направлениях от эмиттера к коллектору и от базового контакта к базе при нулевых приложенных напряжениях и длине базы $L_b = 10 \text{ нм}$. Видно, что область базы образует потенциальный барьер высотой примерно 120 мэВ. В середине базы примыкание контактного нанопровода создает мелкую потенциальную яму глубиной приметно 2 мэВ.

3. Расчет статических характеристик транзистора

Для расчета характеристик РКТ использовалась многокомпонентная модель переноса заряда [7]. Предполагалось, что все компоненты электронного газа находятся в тепловом равновесии при комнатной температуре $T = 300^\circ\text{K}$. Перенос дырок в приборе не учитывался, поскольку характерные времена рекомбинации τ_{rec} и диффузионные длины электронов и дырок L_D в полупроводниках на несколько порядков превышают характерное время релаксации неравновесных электронов

$$\tau_{rel} = \hbar/k_B T \quad (3)$$

и длину L_{rel} . Для кремния при комнатной температуре справедливы оценки

$$\frac{\tau_{rec}}{\tau_{rel}} \sim 10^7, \quad \frac{L_{rec}}{L_{rel}} \sim 10^3. \quad (4)$$

Полагалось, что электроны, попадающие в транзистор из эмиттера и коллектора, находятся между собой в химическом равновесии и имеют химический потенциал F . Электронам, попадающим в прибор из базового контакта, приписывался химический потенциал F_b , вообще говоря, отличный от F . Самосогласованным образом решалась одномерная стационарная краевая задача для уравнений Шредингера, Пуассона и переноса (см., например, [3]).

Если к контактам прибора приложить внешние напряжения, то потенциальные рельефы искажаются. При постоянном смещении между базой и эмиттером V_{be} высота создаваемого базой барьера для электронов мало изменяется с ростом смещения между коллектором и эмиттером V_{ce} . Отношение изменения высоты барьера Δ к eV_{ce} в случае, показанном на рис. 3 (левые кривые), составило 0,1. Искажение потенциала в коллекторе с ростом V_{ce} приводит к увеличению размера области пространственного заряда и сопротивления коллектора, что наглядно демонстрируют выходные вольтамперные характеристики (ВАХ) транзистора при схемах включения с общей базой и общим эмиттером (см. рис. 4-б и рис. 4-д).

Небольшие изменения V_{be} , напротив, существенно понижают потенциальный барьер (см. рис. 3, правые кривые). Отношение изменения высоты барьера Δ к eV_{be} в случае, показанном на рис. 3 (правые кривые) составило 1,2. В результате возрастает инжекция электронов из эмиттера в базу транзистора и плотность тока базы J_b растет экспоненциально (см. рис. 4-а и рис. 4-с).

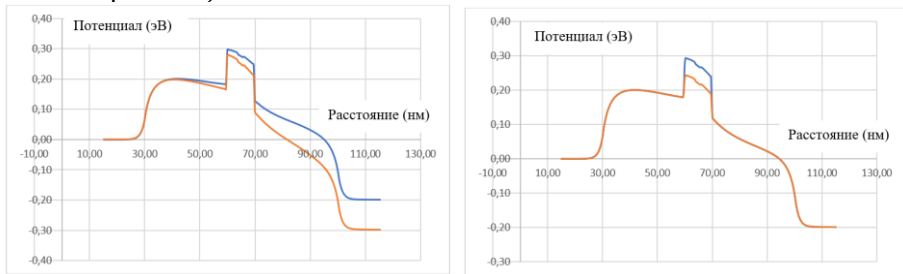


Рис. 3. Потенциальные рельефы для электронов в РКТ от эмиттера до коллектора. Слева: $V_{be} = 0$ В и $V_{ce} = 0$ В (верхняя кривая) и $V_{ce} = 0,2$ В (нижняя кривая). Справа: $V_{ce} = 0,2$ В и $V_{be} = 0$ В (верхняя кривая) и $V_{be} = 0,06$ В (нижняя кривая).

Fig. 3. Potential reliefs for electrons in RCT from emitter to collector. Left: $V_{be} = 0$ V and $V_{ce} = 0$ V (top curve) and $V_{ce} = 0,2$ V (bottom curve). Right: $V_{ce} = 0,2$ V and $V_{be} = 0$ V (upper curve) and $V_{be} = 0,06$ V (lower curve).

Нелинейность ВАХ РКТ и его способность усиливать электрические сигналы обусловлена наличием в базе неравновесных электронов. Мерой уровня неравновесности является разность

$$F_- = F - F_b. \quad (5)$$

В равновесии $F_- = 0$, положительные F_- в какой-либо области свидетельствуют об обогащении ее неравновесными электронами, а отрицательные – об обеднении по сравнению с равновесной концентрацией $n_{eq} = n$ ($F_- = 0$).

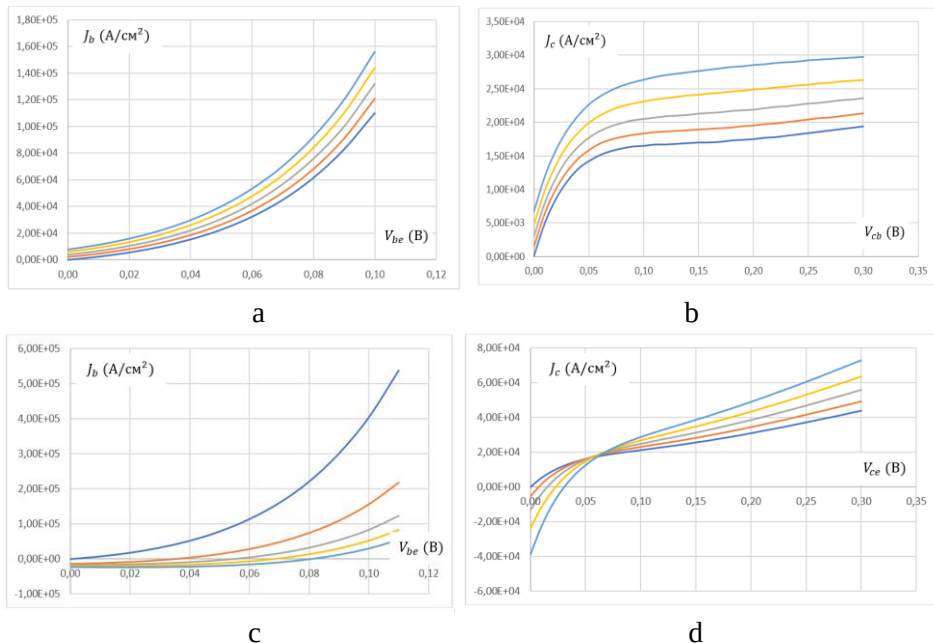


Рис. 4. ВАХ РКТ. Сверху — при схеме включения с общей базой: а — входные ВАХ при изменении V_{cb} от 0 В до 0,2 В с шагом 0,05 В (кривые снизу вверх); б — выходные ВАХ при изменении плотности тока базы J_b от 0 А/см² до $4 \cdot 10^3$ А/см² с шагом $1 \cdot 10^3$ А/см² (кривые снизу вверх). Снизу — при схеме включения с общим эмиттером: с — входные ВАХ при изменении V_{ce} от 0 В до 0,2 В с шагом 0,05 В (кривые снизу вверх); д — выходные ВАХ при изменении напряжения V_{be} от 0 В до 0,04 В с шагом 0,01 В (кривые снизу вверх).

Fig. 4. Current-voltage characteristics of a relaxation quantum transistor. Top – with a connection circuit with a common base: a – input current-voltage characteristics when V_{cb} changes from 0 V to 0.2 V in steps of 0.05 V (curves from bottom to top); b – output current-voltage characteristics when the base current density J_b changes from 0 A/cm² to $4 \cdot 10^3$ A/cm² with a step of $1 \cdot 10^3$ A/cm² (curves from bottom to top). Below – with a connection circuit with a common emitter: c – input current-voltage characteristics when V_{ce} changes from 0 V to 0.2 V in steps of 0.05 V (curves from bottom to top); d – output current-voltage characteristics when voltage V_{be} changes from 0 V to 0.04 V in steps of 0.01 V (curves from bottom to top)

На рис. 5 показано, как функция F_- распределена в транзисторе при различных значениях V_{be} и V_{cb} . Видно, что источниками неравновесности являются переходы эмиттер-база и база-коллектор. При фиксированном напряжении V_{be} с ростом V_{cb} уровень обогащения и размер обогащенной неравновесными электронами области уменьшаются, а уровень обеднения и размер обедненной области увеличиваются, что хорошо видно на рис. 5

и рис. 6 (кривые слева). При фиксированном напряжении V_{bc} с ростом V_{be} увеличивается уровень обогащения и размер обогащенной неравновесными электронами области, а уровень обеднения и размер обедненной области практически не изменяются (см. рис. 5 и рис. 6, кривые справа).

Входные сигналы в РКТ подаются между эмиттером и базой, а выходные снимаются с внешней нагрузки либо между коллектором и эмиттером, либо между коллектором и базой, в зависимости от схемы включения. Усиление входных сигналов обеспечивается неравновесностью носителей заряда в базе. Поток инжектированных из эмиттера неравновесных электронов модулируется напряжением V_{be} . Усиление возможно только тогда, когда значительная часть неравновесных электронов достигнет перехода база-коллектор. В статье [1] получены приближенные формулы для коэффициентов усиления РКТ по току при схемах включения с общей базой

$$\alpha = dJ_c/dJ_e \quad (6)$$

и с общим эмиттером

$$\beta = dJ_c/dJ_b. \quad (7)$$

Из них следует, что

$$\alpha, \beta \sim \exp\{-L_b/L_{rel}\}. \quad (8)$$

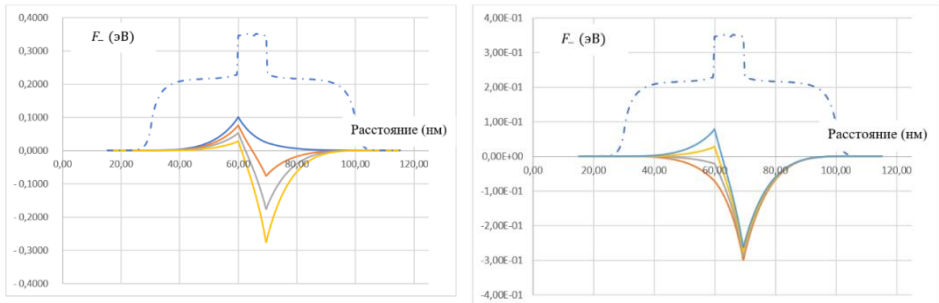


Рис. 5. Функция F_- в РКТ. Слева $V_{be} = 0,1$ В и V_{cb} изменяется от 0 В до 0,3 В с шагом 0,1 В (кривые сверху вниз); справа $V_{cb} = 0,3$ В и V_{be} изменяется от 0 В до 0,15 В с шагом 0,05 В (кривые снизу вверх).

Fig. 5. Function F_- in relaxation quantum transistor. On the left, $V_{be}=0.1$ V and V_{cb} changes from 0 V to 0.3 V in steps of 0.1 V (curves from top to bottom); on the right, $V_{cb}=0.3$ V and V_{be} changes from 0 V to 0.15 V in steps of 0.05 V (curves from bottom to top)

Для рассматриваемого транзистора коэффициент усиления β как функция плотности тока коллектора при фиксированном напряжении V_{ce} показан на рис. 7 слева. Максимальное значение β равно примерно два-

дцати. Столь малая величина коэффициента усиления связана со слишком длинной базой. Уменьшение длины L_b вдвое приводит к возрастанию β до ста шестидесяти, что коррелирует с оценкой (8). Однако изготовление прибора с такими размерами базы представляется проблематичным даже при технологической норме в 2 нм.

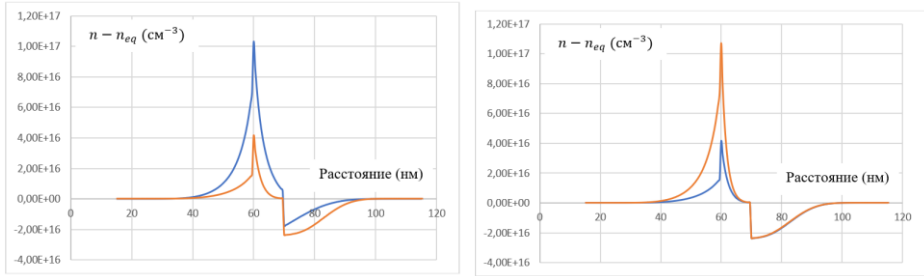


Рис. 6. Отклонение концентрации электронов n в РКТ от равновесного значения n_{eq} . Слева: $V_{be} = 0,1$ В, $V_{cb} = 0,1$ В (верхняя кривая) и $V_{cb} = 0,3$ В (нижняя кривая); справа: $V_{cb} = 0,3$ В, $V_{be} = 0,1$ В (нижняя кривая) и $V_{be} = 0,15$ В (верхняя кривая).

Fig. 6. Deviation of the electron concentration n in the relaxation quantum transistor from the equilibrium value n_{eq} . Left: $V_{be}=0.1$ V, $V_{cb}=0.1$ V (upper curve) and $V_{cb}=0.3$ V (lower curve); right: $V_{cb}=0.3$ V, $V_{be}=0.1$ V (lower curve) and $V_{be}=0.15$ V (upper curve)

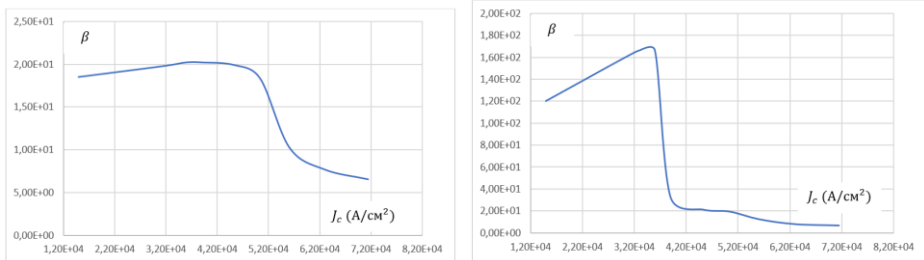


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления РКТ по току при схеме включения с общим эмиттером при $V_{ce} = 0,25$ В от плотности тока коллектора для $L_b = 10$ нм (слева) и $L_b = 5$ нм (справа).

Fig. 7. Dependence of the relaxation quantum transistor current gain in a common-emitter switching circuit at $V_{ce}=0.25$ V on the collector current density for $L_b=10$ nm (left) and $L_b=5$ nm (right)

4. Заключение

Из представленных результатов следует, что кремниевый релаксационный квантовый транзистор вполне может быть создан. Однако для того, чтобы он имел высокий коэффициент усиления, необходимо максимально

уменьшить длину его базы, обеспечив выполнение условия (1). При этом необходимо сохранить контакт к базе. Сочетание этих двух требований делает задачу технологически крайне сложной. При длине базы порядка пяти нанометров и области контакта к ней порядка двух нанометров на остальную часть базы остается всего шесть атомарных слоев кремния.

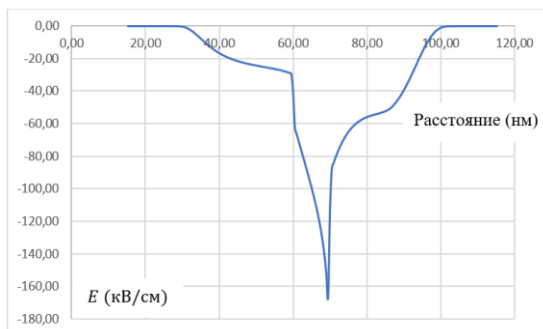


Рис. 8. Величина E — производная от химического потенциала F по координате в РКТ при $V_{cb} = 0,3$ В и $V_{cb} = 0,1$ В.

Fig. 8. The value of E is the derivative of the chemical potential F along the coordinate in the relaxation quantum transistor at $V_{cb}=0.3$ V and $V_{cb}=0.1$ V

Как следует из графика на рис. 8, напряженность электрического поля в области базы достигает величин в сотни кВ/см. То есть скорость электронов в базе транзистора близка к скорости насыщения, составляющей в кремнии $1 \cdot 10^7$ см/с. При длине базы в десять нанометров время пролета электронов через нее составит 0,1 пс, что соответствует предельной рабочей частоте транзистора в 1,6 ТГц.

Характерное удельное сопротивление рассмотренного РКТ составляет примерно $4 \text{ мкОм} \cdot \text{см}^2$. Его удельная барьерная емкость порядка $20 \text{ нФ} \cdot \text{см}^{-2}$. Отсюда следует предельная частота функционирования прибора 1,8 ТГц. Характерная удельная емкость, создаваемая неравновесными электронами, порядка $50 \text{ нФ} \cdot \text{см}^{-2}$. Ее учет снижает оценку предельной рабочей частоты работы РКТ до 0,8 ТГц. Таким образом, есть основания полагать, что кремниевый РКТ сможет функционировать на частотах около одного терагерца, а цифровые схемы из таких транзисторов смогут достичь тактовых частот, близких к 25 ГГц.

Список литературы

1. Обухов И. А. О возможности создания релаксационных квантовых приборов // Письма в ЖТФ. 1993. Т.19, вып. 17. С. 12—16.

2. Обухов И. А., Балабанов В. М. Некоторые возможности квантовых интегральных схем. В сб. : 9-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо`99 (Севастополь, 13—16 сент. 1999 г.). 1999. С. 76—77.
3. Балабанов В. М., Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А. Цифровые схемы на основе квантовых транзисторов // Микроэлектроника. 2021. Т. 50, № 3. С. 190—198. DOI: 10.31857/S0544126921030030.
4. Ashley T., Barnes A. R., Buckle L., Datta S. et al. InSb-based Quantum Well Transistors for High Speed, Low Power Applications // In : 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr. 2005.
5. Datta S., Ashley T., Brask J., Buckle L. et al. 85nm Gate Length Enhancement and Depletion mode InSb Quantum Well Transistors for Ultra High Speed and Very Low Power Digital Logic Applications // In : IEDM Technical Digest. 2005. P. 763—766.
6. Medina-Bailon C., Nedjalkov M., Georgiev V., Selberherr S., Asenov A. Comprehensive mobility study of silicon nanowire transistors using multi-subband models // Nano Express. 2023. Т. 4. 025005.
7. Обухов И. А. Многокомпонентная модель переноса заряда в квантовых полупроводниковых приборах // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 1. С. 24—31. DOI: 10.17587/nmst.23.24-31.

Информация об авторах

Обухов Илья Андреевич, д.ф.-м.н., технический директор АО НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Обухов Илья Ильич, стажер АО НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Silicon Relaxation Quantum Transistor

I. A. Obukhov and I. I. Obukhov

Research and production enterprise "Radiotekhnika"
5th Donskoy proezd, 15, build. 11, Moscow, 119334, Russian Federation
iao001@mail.ru

Received: March 19, 2024

Peer-reviewed: April 1, 2024

Accepted: April 8, 2024

Abstract: The possibility of creating a silicon relaxation quantum transistor has been theoretically investigated. The characteristics of the device are calculated and their relationship with the length of its base is analyzed. It has been shown that to create a transistor of this type on silicon, technologies are needed that make it possible to form structures with characteristic dimensions of one to two nanometers.

Keywords: relaxation quantum transistor, indium antimonide, silicon, low-dimensional structures, nanowires, ultra-high speed, ultra-low power consumption.

For citation (IEEE): I. A. Obukhov and I. I. Obukhov, "Silicon Relaxation Quantum Transistor," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 45–55, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.03. (In Russ.).

References

- [1] I. A. Obukhov, "About the Possibility of Relaxation Quantum Devices Creation", *Tech. Phys. Lett.*, v. 19, no. 9, pp. 537–538, 1993.
- [2] I. A. Obukhov and V. M. Balabanov, "Some possibilities of quantum integrated circuits," in *9th Int. Crimean conf. "Microwave and telecommunication technology" – CriMiCo'99*, Sevastopol, 1999, pp. 76–77. (In Russ.).
- [3] V. M. Balabanov, N. F. Karushkin, I. A. Obukhov, and E. A. Smirnova, "Digital circuits based on quantum transistors," *Microelectronics*, v. 50, no. 9, pp. 190–198, 2021. DOI: 10.31857/S0544126921030030. (In Russ.).
- [4] T. Ashley, A. R. Barnes, L. Buckle, S. Datta et al. "InSb-based Quantum Well Transistors for High Speed, Low Power Applications," in *2005 GaAs MANTECH Conf. Dig.*
- [5] S. Datta, T. Ashley, J. Brask, L. Buckle et al. "85nm Gate Length Enhancement and Depletion mode InSb Quantum Well Transistors for Ultra High Speed and Very Low Power Digital Logic Applications," in *IEDM Technical Digest*, pp. 763–766, 2005.
- [6] C. Medina-Bailon, M. Nedjalkov, V. Georgiev, S. Selberherr, A. Asenov, "Comprehensive mobility study of silicon nanowire transistors using multi-subband models," *Nano Express*, v. 4, 025005, 2023.
- [7] I. A. Obukhov, "Multicomponent Model of Charge Transport in Quantum Semiconductor Devices," *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, vol. 23, no. 1, pp. 24–31, 2021. (In Russ.). DOI: 10.17587/nmst.23.24-31.

Information about the authors

Ilya A. Obukhov, D.Sc., tech. director of JSC NPP "Radiotekhnika", Moscow, Russian Federation.

Ilya I. Obukhov, intern of JSC NPP "Radiotekhnika", Moscow, Russian Federation.

УДК 621.317.757

Измерение параметров комплексных коэффициентов передачи устройств, содержащих преобразования частоты

Коротков К. С., Сердюков В. В., Большов А. В.

Кубанский государственный университет

ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Российская Федерация

korsar@phys.kubsu.ru, serdyukov-vladimir1996@mail.ru

Получено: 14 июля 2023 г.

Отрецензировано: 15 сентября 2023 г.

Принято к публикации: 8 апреля 2024 г.

Аннотация: Ввиду того, что сигнал на входе СВЧ-смесителя и сигнал промежуточной частоты на его выходе лежат в разных диапазонах частот, невозможно традиционными способами измерить сдвиг фаз, вносимый в процессе гетеродинного преобразования частоты входного СВЧ сигнала нелинейным элементом смесителя в сигнал промежуточной частоты. В статье решена проблема измерения истинного сдвига фаз, возникающего в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты. Предложена схема построения прибора, позволяющего измерять сдвиг фаз испытываемого смесителя СВЧ, вносимого его нелинейным элементом в сигнал промежуточной частоты в рабочем режиме эксплуатации. Результаты работы могут быть использованы при создании прибора, позволяющего измерять сдвиг фаз испытываемого смесителя СВЧ.

Ключевые слова: смеситель СВЧ-сигналов, сдвиг фаз, гетеродинное преобразование частоты.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Коротков К. С., Сердюков В. В., Большов А. В. Измерение параметров комплексных коэффициентов передачи устройств, содержащих преобразования частоты // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 56—66.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Коротков, К. С. Измерение параметров комплексных коэффициентов передачи устройств, содержащих преобразования частоты / К. С. Коротков, В. В. Сердюков, А. В. Большов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 56—66.

1. Введение

Каждый нелинейный элемент преобразователя частоты (полупроводниковый диод) содержит реактивности в виде p - n перехода и собственных индуктивностей растекания.

Известно, что реактивности обладают временем задержки для электрического сигнала, протекающего через них, что эквивалентно сдвигу фаз, вносимому реактивным элементом в протекающий через них ток. Поэтому каждый преобразователь частоты вносит фазовый сдвиг в процессе преобразования частоты в электрический сигнал, протекающий через него. Однако измерить такой фазовый сдвиг традиционными методами невозможно в связи с тем, что сигналы на входе и выходе преобразователя имеют разные частоты.

Найден новый способ, позволяющий измерить именно истинный, собственный сдвиг фаз испытуемого СВЧ-смесителя, основанный на измерении суммы и разности комплексных коэффициентов передачи сдвигов фаз двух смесителей, один из которых испытуемый, а другой вспомогательный (опорный) с последующим вычислением на основе измеренных значений истинного сдвига фаз испытуемого смесителя [1].

Предлагаемая работа посвящена описанию структурной схемы построения и теории способа определения сдвига фаз испытуемого СВЧ смесителя.

2. Структурная схема прибора

Структурная схема прибора, реализующего способ «суммы и разности», приведена на рисунке 1. Прибор состоит из векторного анализатора цепей (ВАЦ) — (измерителя параметров четырехполюсников СВЧ) 1 и двухканального супергетеродинного приемника 2, работающих в двух основных режимах:

- режим измерения суммы сдвигов фаз и произведения модулей комплексных коэффициентов передачи испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ-смесителей;

- в режиме измерения разности этих сдвигов фаз с последующим вычислением их истинной величины.

3. Измерение суммы параметров смесителей

Измерение суммы производится с помощью ВАЦ, построенного по классической схеме [2], [3], имеющего в своем составе генератор испытательных СВЧ сигналов 3, переключатель 4, первый и второй каналы СВЧ с

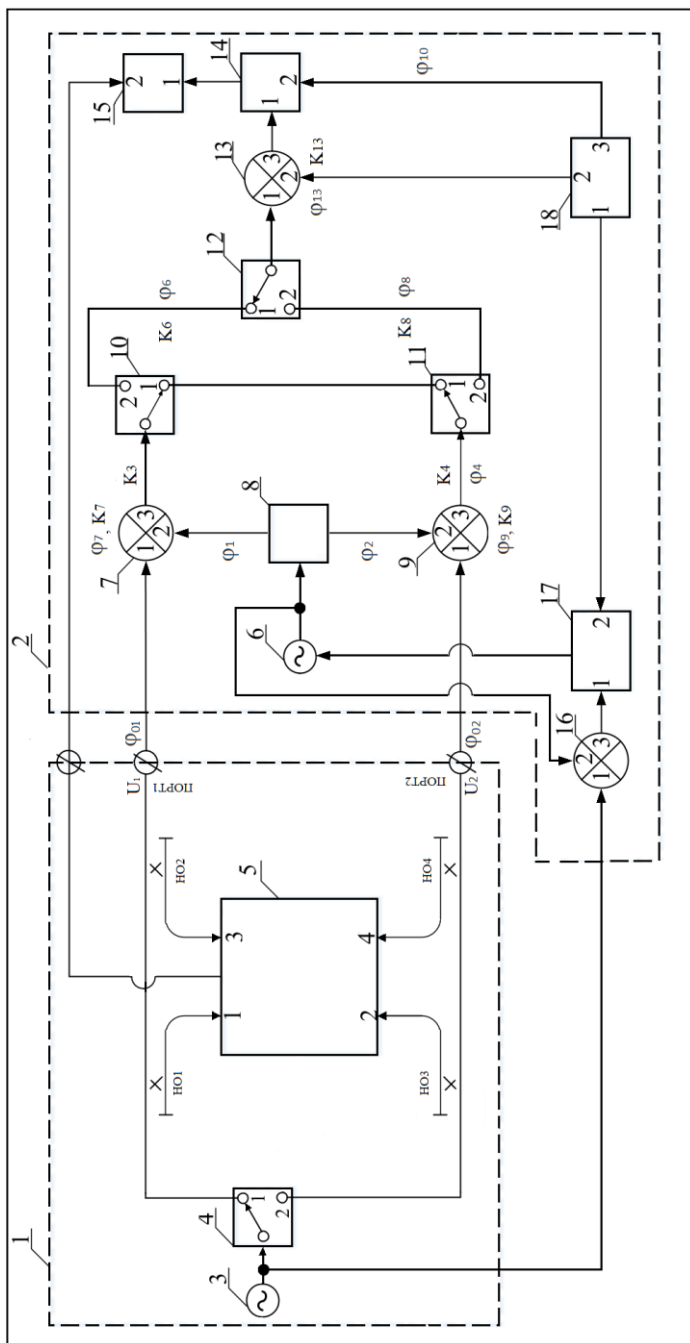


Рис. 1. Структурная схема макета прибора.

Fig. 1. Device layout block diagram

встроенными в них направленными ответвителями, в первый НО₁, НО₂, во второй НО₃, НО₄, векторный вольтметр 5 и первый 1 и второй 2 выходных портов. Для измерения суммы последовательно соединяют с помощью переключателей 10 и 11 в первом положении их подвижных контактов выходы ТРИ испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ смесителей. Испытательный СВЧ-сигнал с частотой f_1 от генератора СВЧ 3 через переключатель каналов 4 в первом положении его подвижного контакта, по первому каналу СВЧ, через порт 1 ВАЦ, подают на первый вход испытуемого 7 СВЧ-смесителя, где смешиваются с СВЧ-сигналом с частотой f_2 , поступающим через делитель СВЧ 8 от генератора СВЧ 6 (гетеродина) на его второй вход.

Образованный в результате преобразования частоты по формуле $f_1 - f_2 = f_{пч1}$ сигнал первой промежуточной частоты (ПЧ), $f_{пч1}$ с выхода ТРИ испытуемого СВЧ-смесителя 7 через переключатели 10 и 11 поступает на контакт ТРИ (выход ПЧ) опорного СВЧ-смесителя 9, работающего в режиме обратного преобразования частоты, на второй вход которого подают сигнал с частотой f_2 через делитель СВЧ 8 также от генератора 6, образованный в результате обратного преобразования частоты по формуле $f_{пч1} + f_2 = f_1$ сигнал с частотой f_1 испытательного СВЧ-сигнала, через второй порт ВАЦ 1 поступает во второй канал СВЧ, из которого его ответвляют с помощью направленного ответвителя НО₄ и подают на четвертый вход векторного вольтметра 5, в котором его сравнивают по амплитуде и фазе с испытательным СВЧ сигналом с частотой f_1 , ответвленным направленным ответвителем НО₁ из первого тракта СВЧ и поданного в векторный вольтметр 5.

Обозначим сдвиг фаз испытуемого СВЧ-смесителя φ_7 , коэффициент передачи K_7 , а сдвиг фаз опорного СВЧ-смесителя φ_9 и его коэффициента передачи K_9 . В результате сравнения испытательного СВЧ-сигнала в векторном вольтметре 9, прошедшего испытуемый 7 и опорный 9 СВЧ-смесители с испытательным СВЧ сигналом, пришедшим на первый вход испытуемого СВЧ-смесителя 7, измеряют сумму сдвигов фаз:

$$\sum \varphi = \varphi_7 + \varphi_9 \quad (1)$$

и произведение модулей:

$$\sum K = K_7 \cdot K_9 \quad (2)$$

(суммы, если в дБ) комплексных коэффициентов передачи испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ-смесителей, которые с выхода векторного вольтметра 5 подают на второй вход компьютера 15 двухканального супергетеродинного приемника 2, где их фиксируют в памяти.

4. Особенности построения структурной схемы прибора

После измерения суммы реализуют режим измерения разности параметров испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ-смесителей с помощью двухканального супергетеродинного приемника 2, в котором его генератор СВЧ 5 связан с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), состоящей из смесителя промежуточной частоты 16 и фазового детектора 17 с генератором испытательных СВЧ-сигналов 3.

ФАПЧ работает следующим образом: испытательный СВЧ-сигнал с частотой f_1 от генератора СВЧ 3 подают на первый вход смесителя ПЧ 16, на второй вход которого поступает сигнал от генератора СВЧ 6. Образованный в результате преобразования в смесителе ПЧ 16 по формуле $f_1 - f_2 = f_{пч1}$ сигнал первой ПЧ $f_{пч1}$ подают на первый вход фазового детектора 17, где сравнивают по частоте и фазе с опорным сигналом $f_{пч1}$, поступающим на его второй вход с первого выхода генератора опорных частот 18. Образованный в результате сравнения сигнал ошибки с выхода фазового детектора 17 подают на вход генератора СВЧ 16, управляя его частотой так, что она с точностью до фазы отличается от частоты испытательного СВЧ-сигнала на величину первой ПЧ $f_{пч1}$. У разных смесителей могут быть разные промежуточные частоты [4], поэтому в приборе первая ПЧ, $f_{пч1}$ сделана переменной и может выбираться любой в широком диапазоне частот путем изменения частоты опорного сигнала от генератора опорных сигналов 18, представляющего собой источник трех когерентных сигналов: первой переменной ПЧ $f_{пч1}$, второй постоянной ПЧ $f_{пч2}$ и третьей вспомогательной ПЧ $f_{пч3}$, образованной по формуле $f_{пч3} = f_{пч1} + f_{пч2}$, которая в процессе работы постоянно отличается от первой переменной ПЧ $f_{пч1}$ на величину второй постоянной ПЧ $f_{пч2}$ во всем диапазоне частот $f_{пч1}$.

5. Режим измерения разности параметров смесителей

Режим измерения разности параметров испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ-смесителей выполняют путем раздельного измерения их комплексных коэффициентов передачи по амплитуде и фазе.

Измерения коэффициентов передачи испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ-смесителей проводят после калибровки ВАЦ, в результате которой амплитуды испытательных СВЧ сигналов U_1 , U_2 и их сдвиги фаз φ_{01} , φ_{02} , от генератора СВЧ 3 на выходе его портов 1 и 2 устанавливаются равными между собой.

Для измерения модуля и сдвига фазы комплексного коэффициента передачи испытуемого СВЧ-смесителя 7 подвижный контакт переключа-

теля 4 устанавливают в первое положение и испытательный СВЧ сигнал от генератора СВЧ 3 с частотой f_1 через первый порт ВАЦ подают на первый вход этого смесителя, в котором его преобразуют с помощью сигнала от генератора СВЧ 6 с частотой f_2 по формуле $f_1 - f_2 = f_{пч1}$ в сигнал первой ПЧ, $f_{пч1}$, который с выхода три испытуемого СВЧ-смесителя 7 через переключатель 10 во втором положении и переключатель 12 в первом положении их подвижных контактов поступает на первый вход смесителя ПЧ 13, в котором с помощью сигнала третьей ПЧ, $f_{пч3}$ от генератора испытательных сигналов 18 подают его на первый вход.

Испытательный сигнал первой ПЧ, $f_{пч1}$ преобразуют по формуле $f_{пч3} - f_{пч1} = f_{пч1} + f_{пч2} - f_{пч1} = f_{пч2}$ в сигнал второй постоянной $f_{пч2}$, который поступает на первый вход компаратора 14. Он представляет собой измеритель отношений сигналов, в котором сравнивают по амплитуде и фазе испытательный сигнал второй ПЧ $f_{пч2}$ с опорным сигналом также второй ПЧ $f_{пч2}$, поданным на его второй вход с третьего выхода генератора опорных частот 18.

6. Вычисление действительных значений модуля и сдвига фаз испытуемого СВЧ смесителя

В соответствии с обозначениями коэффициентов передачи K и сдвигов фаз φ отдельных путей и элементов структурной схемы на рисунке 1 общий коэффициент передачи $\sum K_1$ и общий сдвиг фаз $\sum \varphi_1$ для испытательного сигнала, прошедшего через испытуемый СВЧ – смеситель 7 можно представить в виде:

$$\sum K_1 = K_7 \cdot K_3 \cdot K_6 \cdot K_{13} \quad (3)$$

$$\sum \varphi_1 = \varphi_7 + \varphi_3 + \varphi_6 + \varphi_{13} \quad (4)$$

С учетом этого результаты сравнения отношений амплитуды и фазы испытательного сигнала с амплитудой и фазой опорного сигнала $f_{пч2}$ будем иметь:

$$\frac{U_1 \sum K_1}{U_{пч2}}, \frac{\sum \varphi_1}{\varphi_0} \quad (5)$$

которые подают в компьютер 15, где их фиксируют в памяти.

Аналогично для измерения модуля и сдвига фаз комплексного коэффициента передачи опорного СВЧ смесителя 9 подвижный контакт переключателя 4 ставят во второе положение испытательного СВЧ-сигнала, который через второй порт ВАЦ подают на первый вход опорного СВЧ-смесителя 9, с выхода три которого этот преобразованный сигнал первой

ПЧ $f_{пч1}$ через переключатели 11 и 12 во втором положении их подвижных контактов поступают на первый вход смесителя ПЧ 13, преобразовывают в нем сигналы второй ПЧ, $f_{пч2}$, которые подают на первый вход компаратора 14.

При этом общий коэффициент передачи $\sum K_2$ и $\sum \varphi_2$ пути, пройденного по тракту дважды преобразованным по частоте испытательным сигналом второй ПЧ, $f_{пч2}$ на первом входе компаратора 14 составит

$$\sum K_2 = K_9 \cdot K_4 \cdot K_8 \cdot K_{13} \quad (6)$$

$$\sum \varphi_2 = \varphi_9 + \varphi_4 + \varphi_8 + \varphi_{13} \quad (7)$$

с учетом этого после сравнения в компараторе 14 на его выходе будем иметь сигналы ПЧ 2 с параметрами: по модулю: $\frac{U_2 \sum K_2}{U_{пч2}}$, по фазе: $\frac{\sum \varphi_2}{\varphi_{02}}$, которые подают в компьютер 15, где их фиксируют.

В компьютере 15 вычисляют отношение по модулю ΔK разности сдвигов фаз $\Delta \varphi$ комплексных коэффициентов передачи испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ-смесителей с учетом равенств $U_1 = U_2$; $\varphi_{01} = \varphi_{02}$; $K_3 = K_4$; $K_6 = K_8$ в виде отношения модулей:

$$\Delta K = \frac{\frac{U_1 \sum K_1}{U_{пч2}}}{\frac{U_2 \sum K_2}{U_{пч2}}} = \frac{K_7 \cdot K_3 \cdot K_6 \cdot K_{13}}{K_9 \cdot K_4 \cdot K_8 \cdot K_{13}} = \frac{K_7}{K_9} \quad (8)$$

и разности сдвигов фаз:

$$\Delta \varphi = (\varphi_7 + \varphi_3 + \varphi_6 + \varphi_{13}) - (\varphi_9 + \varphi_4 + \varphi_8 + \varphi_{13}) = \varphi_7 - \varphi_9 \quad (9)$$

С учетом суммы (1) и произведения (2), измеренных с помощью ВАЦ, $\sum \varphi = \varphi_7 + \varphi_9$ и $\sum K = K_7 \cdot K_9$, производят решение системы уравнений

$$\begin{cases} K_7 \cdot K_9 = \sum K \\ \frac{K_7}{K_9} = \Delta K \end{cases} \quad (10)$$

и находят действительное значение модулей коэффициентов передачи испытуемого 7 СВЧ смесителя в виде:

$$K_7 = \sqrt{\Delta K \cdot \sum K} \quad (11)$$

и опорного 9 СВЧ смесителя в виде:

$$K_9 = \sqrt{\frac{\sum K}{\Delta K}} \quad (12)$$

В памяти компьютера 15 также имеются измеренные ранее с помощью векторного анализатора цепей сумма сдвигов фаз испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ смесителей. Решая в компьютере 15 систему уравнений

$$\begin{cases} \varphi_7 + \varphi_9 = \Sigma\varphi \\ \varphi_7 - \varphi_9 = \Delta\varphi \end{cases} \quad (13)$$

находим истинный сдвиг фаз испытуемого СВЧ смесителя

$$\varphi_7 = \frac{\Sigma\varphi + \Delta\varphi}{2} \quad (14)$$

$$\varphi_9 = \frac{\Sigma\varphi - \Delta\varphi}{2} \quad (15)$$

В результате получаем абсолютные (истинные) значения величин модуля К и фазы φ комплексных коэффициентов передачи испытуемого 7 и опорного 9 СВЧ-смесителей.

Полученные истинные значения модуля и фазы комплексного коэффициента передачи испытуемого СВЧ-смесителя 7 выводятся на экран компьютера 15 для выбранной частотной точки рабочего диапазона генератора испытательных СВЧ-сигналов 3. Общее количество таких точек в виде амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик этого СВЧ смесителя в панорамном режиме его испытаний при автоматическом качании генератора испытательных СВЧ сигналов 3 наблюдается на экране компьютера 15.

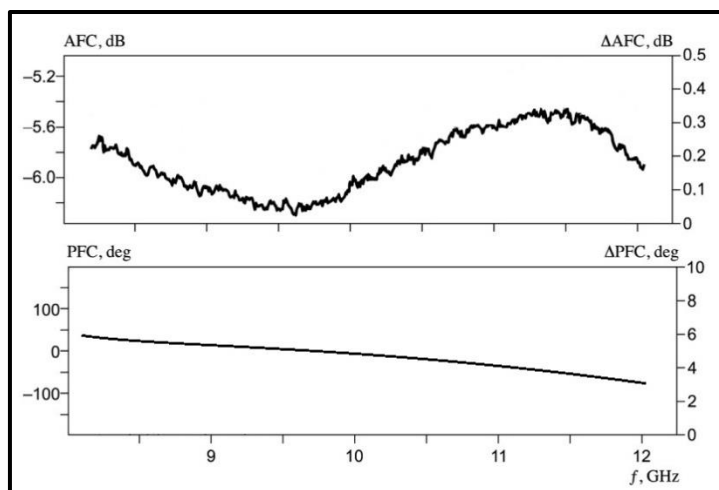


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ смесителя *Magnum MC64PG-11* (USA).

Fig. 2. AFR and PFR of the *Magnum MC64PG-11* mixer (USA)

На рисунке 2 приведены амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики смесителя *Magnum MC64PG-11 (USA)*, снятые в диапазоне 8—12 ГГц при промежуточной частоте 20 МГц, выполненные на макете прибора, построенного по структурной схеме 1 методом суммы и разности.

7. Заключение

Как показали экспериментальные исследования макета прибора для измерения модуля сдвига фаз комплексных коэффициентов СВЧ устройств, содержащих преобразование частоты, способ измерения и структурная схема его построения позволяют измерять истинное значение сдвига фаз, вносимых таким устройством в сигнал, преобразуемый им по частоте. Представленный прибор работает в диапазоне 8—12 ГГц, первая промежуточная частота в диапазоне от 20 до 100 МГц, вторая — 275 кГц, динамический диапазон комплексных коэффициентов передачи по модулю 60 дБ, пределы измерения фазы 0—360 градусов, погрешности измерений по модулю 0,4 дБ, по фазе 0,1 градуса без учета коэффициента отражения. Образец прибора был отправлен в один из НПО города Москвы.

Список литературы

1. Коротков К. С., Фролов Д. Р., Бабенко А. А., Левченко А. С. Устройство для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ устройств с преобразованием частоты. Патент РФ на изобретение № 2649861, опубликовано: 10.04.2018.
2. Дансмор Дж. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М. : Техносфера, 2019. 735 с.
3. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. М. : Изд. дом МЭИ, 2009. 500 с.
4. Дингес С. И., Кочемасов В. Н. Устройства преобразования частот. М. : Горячая линия — Телеком, 2021. 432 с.

Информация об авторах

Коротков Константин Станиславович, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой Кубанского государственного университета, г. Краснодар, Российская Федерация.

Сердюков Владимир Владимирович, аспирант Кубанского государственного университета, г. Краснодар, Российская Федерация.

Большов Арсений Викторович, студент Кубанского государственного университета, г. Краснодар, Российская Федерация.

Measurement of Parameters of Complex Transmission Coefficients of Devices Containing Frequency Conversions

K. S. Korotkov, V. V. Serdyukov, and A. V. Bol'shov

Kuban State University

Stavropolskaya st., 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation

korsar@phys.kubsu.ru, serdyukov-vladimir1996@mail.ru

Received: July 14, 2023

Peer-reviewed: September 15, 2023

Accepted: April 8, 2024

Abstract: *The scheme and prototype of a device for measuring the true values of phase shifts and the module of the complex transmission coefficient of devices containing a frequency converter – a microwave mixer are considered, the theory of measurements is given. Since the signal at the input of the microwave mixer and the intermediate frequency signal at its output lie in different frequency ranges, it is impossible to measure by traditional methods the phase shift introduced by the nonlinear element of the mixer into the intermediate frequency signal during the heterodyne frequency conversion of the input microwave signal. a new method has been used to measure precisely the true, intrinsic phase shift of the tested microwave mixer, based on measuring the sum and difference of the complex coefficients of transmission of phase shifts of two mixers, one of which is the test and the other auxiliary (reference), followed by calculation based on the measured values of the true phase shift of the tested mixer. The presented prototype operates in the range of 8–12 GHz, the first intermediate frequency in the range from 20 to 100 MHz, the second 275 kHz, the dynamic range of complex transmission coefficients modulo 60 dB, the limits of phase measurement 0–360 degrees, measurement errors modulo 0.4 dB in phase 0.1 degrees without taking into account the reflection coefficient.*

Keywords: Microwave signal mixer, phase shift, heterodyne frequency conversion.

For citation (IEEE): K. S Korotkov, V. V. Serdyukov, and A. V. Bol'shov, "Measurement of Parameters of Complex Transmission Coefficients of Devices Containing Frequency Conversions," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 56–66, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.04. (In Russ.).

References

- [1] K. S. Korotkov, D. R. Frolov, A. A. Babenko, and A. S. Levchenko, Device for measuring complex transmission and reflection coefficients of microwave devices with frequency conversion, RF pat. for an inv. no 2649861, publ. 10.04.2018. (In Russ.).
- [2] J. P. Dunsmore, *Handbook of microwave component measurements with advanced VNA techniques*, Wiley & Sons, Ltd., 2012.

- [3] M. Hiebel, *Fundamentals of Vector Network Analysis*, Rohde & Schwarz, 2007.
- [4] S. I. Dinges, V. N. Kochemasov, *Frequency conversion devices*, Moscow : Goryachaya Liniya – Telecom, 2021.

Information about the authors

Konstantin S. Korotkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation.

Vladimir V. Serdyukov, post-graduate student of Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation.

Arseny V. Bolshov, student of Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation.

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 7, no. 1, pp. 67–80, 2024.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 1. С. 67—80.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.05

УДК 621.396.67

Учет ЭМС при определении дальности ОВЧ радиосвязи в направлении судно — берег

Козуб М. С.

*Севастопольский испытательный центр «Омега» — филиал ФГБУ НИИР
ул. Вакуленчука, 29, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
kozub@niir.ru*

Получено: 3 августа 2023 г.

Отрецензировано: 15 сентября 2023 г.

Принято к публикации: 8 апреля 2024 г.

Аннотация: Представлена методика прогнозирования граничной дальности радиосвязи береговых объектов ГМССБ и СУДС, работающих в ОВЧ диапазоне в направлении судно — берег с учетом ЭМС. Приведена методика оценки обеспечения ЭМС на основе использования измеренных значений фактической чувствительности в качестве критерия обеспечения ЭМС при заданной нормативной дальности.

Ключевые слова: радиосвязь, диапазон ОВЧ, электромагнитная совместимость, фактическая чувствительность, граничная дальность радиосвязи, отношение сигнал/шум, взаимные помехи в локальной группировке.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Козуб М. С. Учет ЭМС при определении дальности ОВЧ радиосвязи в направлении судно — берег // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 1. С. 67—80.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Козуб, М. С. Учет ЭМС при определении дальности ОВЧ радиосвязи в направлении судно — берег / М. С. Козуб // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 67—80.

1. Введение

Проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию, освидетельствование береговых объектов (станций) морского района А1 глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (БС МР А1 ГМССБ), а также радиотехнических постов системы управления движением судов (РТП СУДС) обязательно сопровождаются прогнозированием дальности действия радиосвязи в диапазоне очень высоких частот (ОВЧ).

В соответствии с [1, 2] радиосвязь в диапазоне ОВЧ с судами должна осуществляться:

- в двустороннем режиме телефонии и цифрового избирательного вызова (ЦИВ) для БС МР А1 ГМССБ;

- в двустороннем режиме телефонии для РТП СУДС. Также для СУДС в диапазоне ОВЧ должна обеспечиваться непрерывная работа автоматической информационной (идентификационной) системы (АИС).

Прогнозирование дальности радиосвязи с судами в диапазоне ОВЧ должно учитывать ряд особенностей, в частности:

- двунаправленность радиолинии (направления передачи берег — судно и судно — берег);

- типовые (регламентированные) характеристики судового оборудования [3];

- мало изменяющиеся значения внешних шумов на входе судового радиоприемного устройства (РПУ);

- индивидуальные параметры береговой антенны и антенно-фидерного тракта;

- изменяющиеся в широких пределах значения взаимных радиопомех на входе берегового РПУ от передатчиков, расположенных в локальной группировке, а также внешних шумов, в том числе промышленных.

Взаимные помехи могут проникать по соседним, зеркальным или другим нелинейным каналам приема, могут быть обусловлены эффектами блокирования и интермодуляции, и являются помехами, вызванными недостаточным обеспечением электромагнитной совместимости (ЭМС).

В качестве количественного параметра качества радиосвязи при прогнозировании в направлении берег — судно используют значения напряженности поля полезного сигнала [4]. Методика расчета граничной дальности для направления берег — судно подробно изложена в [5].

Объектом исследований настоящей работы является методика прогнозирования граничной дальности для направления судно — берег с учетом степени обеспечения ЭМС и определение количественного критерия оценки обеспечения ЭМС на береговом объекте ГМССБ и СУДС.

2. Теоретическая часть

Необходимо ввести и обосновать количественный показатель, который будет определять качество радиосвязи для направления судно — берег и, как результат, выступать критерием при прогнозировании граничной дальности радиосвязи в диапазоне ОВЧ для данного направления. Этот показатель должен также учитывать влияние фактических парамет-

ров технических средств БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС, таких как: антенно-фидерный тракт береговой радиостанции, фильтры, грозоразрядники и другие технические средства, включенные в состав БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС и расположенные в тракте РПУ береговой радиостанции. Также важно, чтобы данный показатель можно было измерить на этапе натурных испытаний и использовать при оценке обеспечения технических средств БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС требований по ЭМС.

В качестве такого показателя предлагается выбрать параметр в виде ЭДС сигнала ε_c , поступающего на вход РПУ береговой радиостанции от штатной антенны (штатно установленной на мачте) через все фактически установленные в тракт устройства (фидер, фильтры, грозоразрядники и т. п.) между антенной и входом РПУ береговой радиостанции.

Требуемое качество радиосвязи, определяемое документами [3, 6], определяется по превышению на заданную величину отношения сигнал/шум на входе РПУ береговой радиостанции уровнем электродвижущей силы (ЭДС) полезного сигнала суммарного уровня шумов и помех (в условиях фактической электромагнитной обстановки), приведенных ко входу РПУ. Ниже приводится количественное определение необходимого (порогового) значения ЭДС полезного сигнала на входе РПУ $\varepsilon_c^{\text{необх}}$.

Внешние и внутренние шумы, а также взаимные помехи могут проникать на вход РПУ береговой радиостанции различными способами. Влияние на качество радиосвязи в направлении Судно — берег внешних шумов $E_{\text{ш}}^B$ и взаимных помех $E_{\text{п}}^B$ в локальной группировке технических средств на БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС вблизи антенны A_B береговой радиостанции и, в последствии, проникающих на вход РПУ, удобно представить в виде, как показано на рисунке 1.

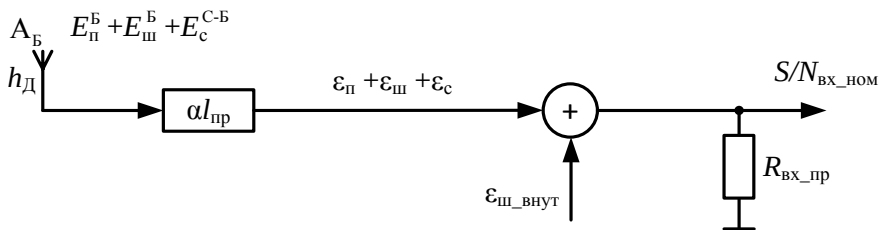


Рис. 1. Схема представления внешних шумов $E_{\text{ш}}^B$ и взаимных помех $E_{\text{п}}^B$ в локальной группировке технических средств на БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС.

Fig. 1. Scheme of representation of external noise $E_{\text{ш}}^B$ and mutual interference $E_{\text{п}}^B$ in a local grouping of technical equipment at coastal stations of the GMDSS sea area A1 or radio technical posts of the vessel traffic control system

Из рисунка 1 следует, что на вход РПУ береговой радиостанции действуют:

— ЭДС внутренних шумов РПУ $\varepsilon_{\text{ш_внут}}$, определяемая через номинальную чувствительность $G_{\text{ном}}$ и номинальное отношение сигнал/шум на входе приемника $SN_{\text{вх_ном}}$ [4]:

$$\varepsilon_{\text{ш_внут}} = G_{\text{ном}}/SN_{\text{вх_ном}}, \text{ В.} \quad (1)$$

— ЭДС внешних шумов $\varepsilon_{\text{ш}}$, определяемая через напряженность поля внешних шумов $E_{\text{ш}}^{\text{Б}}$, действующей высоты антенны $h_{\text{д}}$, а также коэффициента передачи фидерного тракта и дополнительных фильтров приемника $\alpha l_{\text{пр}}$ [4]:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = E_{\text{ш}}^{\text{Б}} \cdot h_{\text{д}} \cdot \alpha l_{\text{пр}}, \text{ В.} \quad (2)$$

— ЭДС радиопомех $\varepsilon_{\text{п}}$, обусловленная взаимными радиопомехами от соседних радиоэлектронных средств локальной группировки и приведенная ко входу РПУ в соответствии с [7]:

$$\varepsilon_{\text{п}} = 2\sqrt{P_{\text{пом}\Sigma} \cdot R_{\text{вх_пр}}}, \text{ В,} \quad (3)$$

где

$P_{\text{пом}\Sigma}$, Вт — суммарная мощность радиопомех, приведенная ко входу РПУ, и определенная в соответствии с [7];

$R_{\text{вх_пр}}$ — входное сопротивление РПУ. Для радиостанций с угловой модуляцией морской подвижной службы $R_{\text{вх_пр}} = 50$ Ом.

Суммарная ЭДС шумов и помех ε_{Σ} , приведенная ко входу РПУ, определяется как корень из суммы квадратов описанных выше составляющих [4]:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \sqrt{\varepsilon_{\text{п}}^2 + \varepsilon_{\text{ш}}^2 + \varepsilon_{\text{ш_внут}}^2}, \text{ В.} \quad (4)$$

Расчет необходимого значения ЭДС сигнала $\varepsilon_{\text{с}}^{\text{необх}}$ на входе РПУ производится на основе того, что уровень сигнала должен превышать суммарный уровень шумов и помех, приведенных ко входу РПУ, на заданную величину отношения сигнал/шум на входе РПУ:

$$\varepsilon_{\text{с}}^{\text{необх}} = \varepsilon_{\Sigma} \cdot SN_{\text{вх_ном}} = \sqrt{G_{\text{ном}}^2 + [(E_{\text{ш}}^{\text{Б}} \cdot h_{\text{д}} \cdot \alpha l_{\text{пр}})^2 + 4P_{\text{пом}\Sigma} R_{\text{вх_пр}}]} \cdot SN_{\text{вх_ном}}, \text{ В.} \quad (5)$$

Значение ЭДС сигнала, описанное выражением (5), является фактической чувствительностью РПУ [4] $\varepsilon_{\text{факт}}$ (в условиях воздействия внешних шумов и электромагнитных помех), при которой обеспечивается заданное отношение сигнал/шум на выходе РПУ $SN_{\text{вых_ном}}$:

$$\left. \varepsilon_{\text{факт}} \right|_{SN_{\text{вых}} = SN_{\text{вых_ном}}} = \sqrt{G_{\text{ном}}^2 + [(E_{\text{ш}}^{\text{Б}} \cdot h_{\text{д}} \cdot \alpha l_{\text{пр}})^2 + 4P_{\text{пом}\Sigma} R_{\text{вх_пр}}]} \cdot SN_{\text{вх_ном}}^2, \quad (6)$$

Таким образом, можно сформировать граничный критерий дальности действия радиосвязи в диапазоне ОВЧ в направлении судно — берег: значение ЭДС сигнала на входе РПУ береговой радиостанции $\varepsilon_{\text{с}}$, при дальности $D = D_{\text{max}}$, должно быть больше фактической чувствительности РПУ $\varepsilon_{\text{факт}}$ с учетом наихудшей электромагнитной обстановки в группировке технических средств на БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС и для максимально возможного уровня шума при типовых значениях параметров излучения технических средств судового радиооборудования.

$$\left. \varepsilon_{\text{с}} \right|_{D = D_{\text{max}}} > \varepsilon_{\text{факт}}. \quad (7)$$

При прогнозировании дальности радиосвязи используется методика, основанная на интерполяции/экстраполяции по полученным эмпирическим путем кривым напряженности поля как функциям расстояния, высоты антенны, частоты и процента времени доступности радиосвязи согласно [8].

Как показано в [5], аналогично для направления берег — судно суть используемой методики в направлении судно — берег состоит в определении соответствия между значениями напряженности поля сигнала, создаваемого радиопередающим устройством на судне с заданной эффективно излучаемой мощностью на номинальной частоте, и пороговым значением требуемой напряженности поля на берегу, при которой достигаются заданные качество и доступность радиосвязи, с тем лишь отличием, что значения напряженности поля сигнала приведены к ЭДС на входе РПУ через коэффициент усиления антенны $G_{\text{и}}$ и коэффициент передачи фидерного тракта и потери в дополнительных фильтрах $\alpha l_{\text{пр}}$ береговой станции, а в качестве порогового значения используется фактическая чувствительность РПУ $\varepsilon_{\text{факт}}$.

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости граничной дальности радиосвязи от фактической чувствительности РПУ береговой радиостанции, выраженной в значениях ЭДС ($\varepsilon_{\text{факт_эдс}}$) в направлении судно — берег. Как будет показано далее, представление зависимостей граничной дальности радиосвязи именно от фактической чувствительности позволит в дальнейшем определить критерий обеспечения ЭМС и метод его оценки при проведении испытаний.

На практике таких зависимостей может быть построено множество в соответствии с фактическими значениями тех или иных параметров технических средств. В данной работе зависимости представлены для наиболее типовых значений параметров технических средств (табл. 1).

Радиосвязь в диапазоне ОВЧ осуществляется на частотах морской подвижной связи в диапазонах 156,025—157,625 МГц (телефония и ЦИВ) и 160,625—162,025 МГц (АИС). Поскольку в указанных диапазонах существенных отличий по характеристикам оборудования и распространению радиоволн не отмечается, зависимости на рис. 2 приведены для частоты основного канала телефонии МР А1 ГМССБ — 16 (156,8 МГц).

Табл. 1. Параметры технических средств, используемые в расчете.

Table 1. Parameters of technical means used in the calculation

№	Параметр	Значение
1.	Высота установки судовой антенны h_2	4 м
2.	Мощность передатчика судовой станции $P_{\text{прд}}^{\text{Судно}}$	6 Вт
3.	Коэффициент передачи фидерного тракта на судне с учетом дополнительного фильтра $\alpha l_{\text{прд}}$ (для высоты установки судовой антенны $h_2 = 4$ м.) <i>Примечание: исходя из типовых значений длины и параметров применяемых фидеров.</i>	–1,7 дБ
4.	Коэффициент усиления судовой антенны $G_{\text{н}}^{\text{Судно}}$ <i>Примечание: с учетом неравномерности диаграммы направленности антенны, установленной на судне.</i>	0 дБи
5.	Коэффициент усиления антенны береговой радиостанции с учетом потерь в фидерном тракте. <i>Примечание: с учетом неравномерности диаграммы направленности антенны, установленной на мачте БС.</i>	0 дБи
6.	Отношение сигнал/шум на выходе РПУ береговой радиостанции в режиме телефонии $SN_{\text{вых}}^{\text{ТЛФ}}$ <i>Примечание: [3, 6]</i>	20 дБ
7.	Высота установки антенны береговой радиостанции h_1 .	4 м, 10 м, 20 м, 37,5 м, 75 м, 150 м, 300 м, 600 м, 1200 м

На рис. 2 штриховой линией показана граничная дальность ОВЧ радиосвязи с ограничением по дальности радиогоризонта на основе формулы, приведенной в [6]:

$$A = 2,5(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \text{ м.м.} \quad (8)$$

Формула (8) служит только для административного назначения дальности радиосвязи БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС, т. к. не учитывает:

- эффективную излучаемую мощность передатчика;
- чувствительность РПУ;
- фактическую электромагнитную обстановку на приемной стороне.

Соответственно, реальная граничная дальность радиосвязи судно — берег может быть как существенно больше, так и существенно меньше дальности, определенной формулой (8). Задача технических служб состоит в том, чтобы с помощью выбора значений параметров задействованных технических средств обеспечить административно определенную дальность радиосвязи.

Представленная выше методика прогнозирования граничной дальности радиосвязи для направления судно — берег на основе расчета фактической чувствительности пригодна для этапа проектирования БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС с целью определения / оценки требуемой нормативной дальности радиосвязи. Соответственно, для оценки и для обеспечения ЭМС на БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС на этапе проектирования необходимо рассчитать фактическую чувствительность РПУ береговой радиостанции $\epsilon_{\text{факт}}$ в соответствии с формулой (6) для наихудшей с точки зрения ЭМС комбинации передающих средств в локальной группировке на стороне БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС, включаемых одновременно и при воздействии внешних шумов на входе РПУ. Далее необходимо сравнить рассчитанное значение $\epsilon_{\text{факт}}$ с требуемым значением для достижения нормативной дальности по графикам, аналогичным приведенным на рис. 2, для фактических параметров радиооборудования БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС. При превышении расчетным значением $\epsilon_{\text{факт}}$ требуемого значения считать ЭМС на береговом объекте необеспеченной и принять организационные меры по устранению основных источников помех.

Использование расчетного метода определения фактической чувствительности $\epsilon_{\text{факт}}$ по формуле (6) имеет следующие недостатки:

- не учитываются все факторы реальной электромагнитной обстановки, а также пути проникновения шумов и электромагнитных помех на вход РПУ, в том числе по цепям питания и др.;

- не всегда можно достаточно точно рассчитать суммарную мощность радиопомех, приведенной ко входу РПУ $P_{\text{пом\epsilon}}$, Вт.

В связи с этим на этапе введения в эксплуатацию или при проведении освидетельствования БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС согласно [9] для уточнения дальности связи уже созданного берегового объекта проводятся натурные испытания, в процессе проведения которых экспериментально оценивается степень обеспечения ЭМС и практически достигнутая

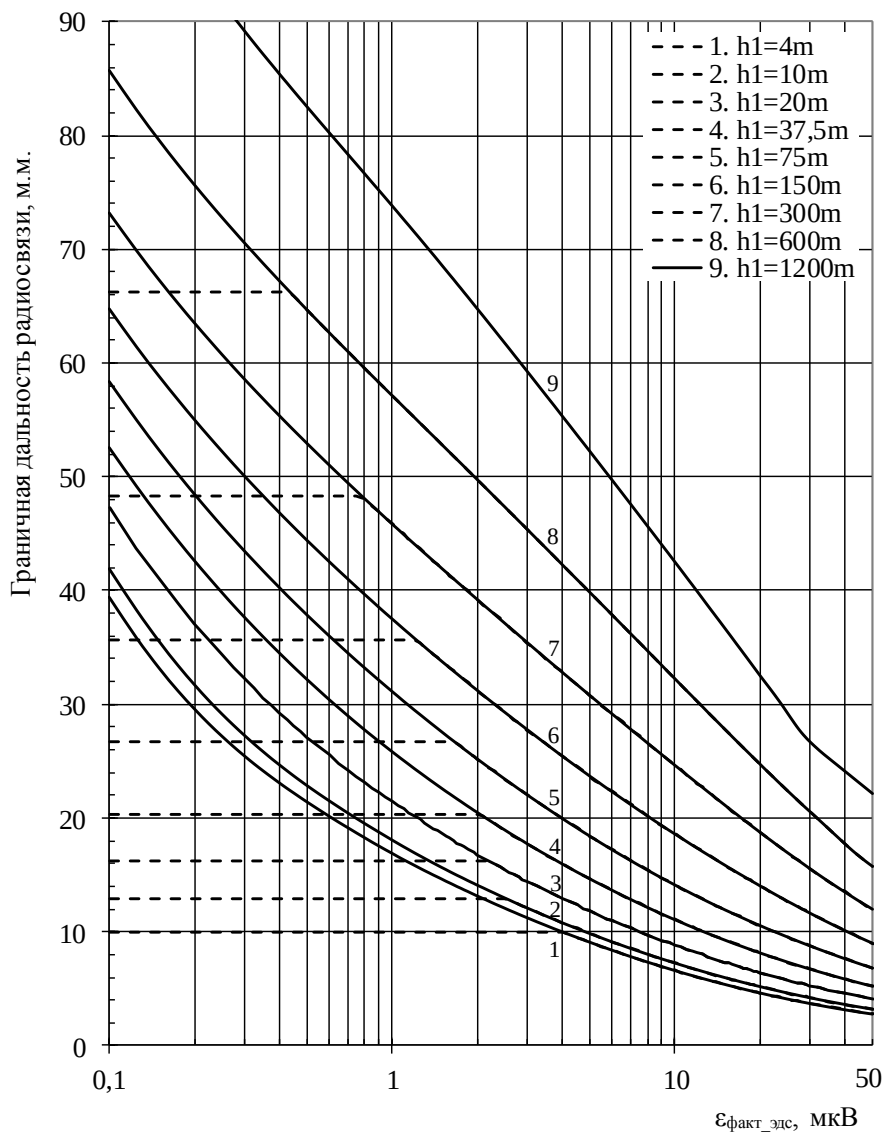


Рис. 2. Зависимости граничной дальности радиосвязи от фактической чувствительности ($\epsilon_{\text{факт_эдс}}$) РПУ береговой радиостанции в режиме телефонии для направления судно — берег.

Fig. 2. Dependence of the limiting range of radio communication on the actual sensitivity ($\epsilon_{\text{факт_эдс}}$) of the radio receiver of a coastal radio station in telephony mode for the direction ship – shore

граничная дальность радиосвязи. Экспериментальная оценка включает в себя проведение измерения значения фактической чувствительности $\epsilon_{\text{факт}}$ в реальных условиях эксплуатации РПУ береговой радиостанции при воздействии всех внешних шумов, внутренних шумов и помех от радиоэлектронных средств, расположенных в непосредственной близости от РПУ береговой радиостанции, то есть в условиях реальной (фактической) электромагнитной обстановки.

Кроме того, согласно [9] в процессе проведения натурных испытаний отдельно требуется оценка обеспечения ЭМС. При этом в нормативных документах отсутствует критерий обеспеченности ЭМС. Как следует из приведенных выше рассуждений, именно фактическая чувствительность может являться тем количественным критерием, позволяющим сделать вывод об обеспечении нормативной дальности радиосвязи с учетом ЭМС и, соответственно, о самом факте обеспечения ЭМС.

Измерение фактической чувствительности РПУ в режиме телефонии для БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС проводится по схеме, представленной на рисунке 3.

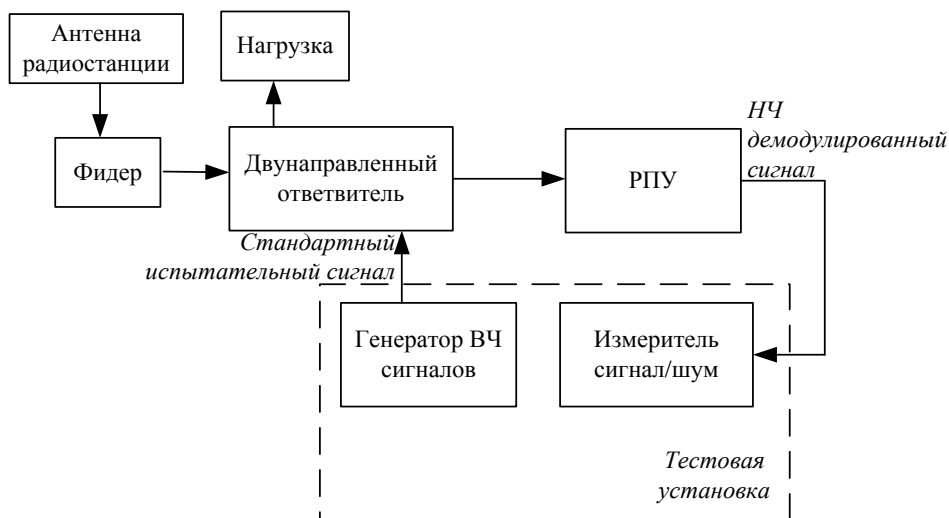


Рис. 3. Структурная схема измерения фактической чувствительности РПУ в режиме телефонии.

Fig. 3. Block diagram of measuring the actual sensitivity of a radio receiver in telephony mode

Структурная схема измерения фактической чувствительности РПУ аналогична стандартной схеме измерения номинальной чувствительности за исключением того, что совместно со стандартным испытательным сиг-

налом через двунаправленный ответвитель на вход РПУ береговой радиостанции подключен ее штатный фидер и антенна. Вносимыми двунаправленным ответвителем потерями от разъема фидера до входа РПУ можно пренебречь ($\leq 0,1$ дБ). Во время измерения фактической чувствительности РПУ береговой радиостанции поочередно включают на передачу радиоизлучающие устройства, расположенные в локальной группировке, во всех возможных каналах и контролируют значение отношения сигнал/шум на выходе РПУ радиостанции (20 дБ для режима телефонии) на проверяемом канале. Измеряется значение фактической чувствительности при воздействии помех как уровень ЭДС входного стандартного испытательного ВЧ-сигнала, при котором отношение сигнал/шум на выходе приемника береговой станции остается равным 20 дБ.

Измерение фактической чувствительности РПУ в режиме ЦИВ для БС МР А1 ГМССБ проводят по схеме, представленной на рисунке 4.

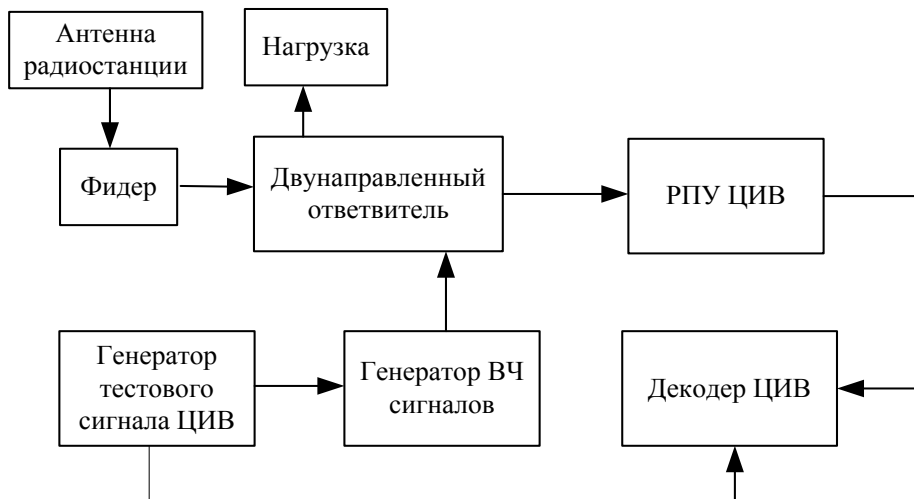


Рис. 4. Структурная схема измерения фактической чувствительности РПУ ЦИВ.

Fig. 4. Block diagram of measuring the actual sensitivity of a digital selective calling radio receiver

Фактическая чувствительность РПУ ЦИВ — это минимальный уровень стандартного испытательного ВЧ-сигнала на номинальной частоте, поданного на вход РПУ через двунаправленный ответвитель совместно с помехами и шумами, поступающими через антенно-фидерный тракт, при которых коэффициент ошибок приема символов (character error rate) на выходе РПУ ЦИВ равен 10^{-2} .

В качестве измерителя коэффициента ошибок используется декодер ЦИВ, который позволяет подсчитывать количество ошибок в принятых сериях сообщений ЦИВ при сравнении их с переданными сообщениями. В качестве генератора тестового сигнала ЦИВ (кодера) может выступать НЧ генератор, имеющий возможность передавать стандартные тестовые сигналы, состоящие из ряда последовательностей вызовов. В качестве декодера сигнала ЦИВ может выступать НЧ анализатор с функцией декодирования FSK модуляции.

Как и для режима телефонии, во время измерения фактической чувствительности РПУ ЦИВ поочередно включают на передачу все радиоизлучающие устройства, расположенные в локальной группировке, которые могут работать одномоментно.

Анализ учета ЭМС АИС для СУДС подробно описана в [11] и в данной работе не представлена.

По результатам измерений фактической чувствительности ЭМС БС МР А1 ГМССБ или РТП СУДС в ОВЧ диапазоне считается обеспеченной, если измеренное значение фактической чувствительности не хуже порогового значения фактической чувствительности, при которой обеспечивается нормативная дальность радиосвязи в направлении судно — берег (см. рис. 2) для каждого конкретного режима работы (телефония, ЦИВ, АИС).

3. Заключение

В работе сформулирована и детализирована методика прогнозирования граничной дальности в направлении судно — берег с учетом ЭМС на этапе проектирования береговых объектов ГМССБ и СУДС, работающих в ОВЧ диапазоне. Приведена методика оценки обеспечения ЭМС береговых объектов ГМССБ и СУДС, работающих в ОВЧ диапазоне на основе использования значений фактической чувствительности в качестве критерия обеспечения ЭМС при заданной нормативной дальности. Данный критерий обеспечения ЭМС может быть определен как расчетным путем на этапе проектирования берегового объекта, так и экспериментальным путем при проведении натурных испытаний уже действующего берегового объекта.

Список литературы

1. Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане. Системы обеспечения безопасности мореплавания.
URL: http://morinfocenter.ru/marine_safety_systems.asp.

2. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Коваленко В. И. Основные направления совершенствования натурных испытаний береговых объектов и центров СУДС и ГМССБ // Труды НИИР. 2019. №1. С. 63—68.
3. Резолюция ИМО А.803(19). Эксплуатационные требования к судовым УКВ радиостанциям, обеспечивающим радиотелефонную связь и цифровой избирательный вызов. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.803\(19\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.803(19).pdf).
4. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Иевлев К. В., Козуб М. С. Инструментальные методы измерения качества судовой ОБЧ радиосвязи // Труды НИИР. 2021. №1. С. 25—32.
5. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Козуб М. С. Методика оценивания граничной дальности береговых радиостанций СОБМ в ОБЧ диапазоне для направления берег — судно // Труды НИИР. 2021. № 3. С. 40—45.
6. Резолюция ИМО А.801(19) «Обеспечение радиослужб для Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ)». 23.11.1995 г. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.801\(19\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.801(19).pdf).
7. ГОСТ Р 55898-2013. Технические средства радиосвязи. Взаимные радиопомехи в локальной группировке. Методы расчета. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107802>.
8. Рекомендация МСЭ-R P.1546-6 «Метод прогнозирования для трасс связи “пункта с зоной” для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц». URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-1!!PDF-R.pdf.
9. Приказ Министерства транспорта РФ от 23 июля 2015 г. № 226 «Об утверждении требований к радиолокационным системам управления движением судов, объектам инфраструктуры морского порта, необходимым для функционирования глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности, объектам и средствам автоматической информационной системы, службе контроля судоходства и управления судоходством». URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=261562>.
10. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Козуб М. С. и др. Методика проведения натурных испытаний береговых объектов ГМССБ А1 // Электросвязь. 2022. № 03. С. 30—34.
11. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Коваленко В. И. и др. Особенности проведения натурных испытаний АИС в условиях электромагнитных помех // Труды НИИР. 2023. № 2. С. 15—21.

Информация об авторе

Козуб Максим Сергеевич, аспирант кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» Севастопольского государственного университета, начальник НТО Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

Consideration of the EMC in Determining the Distance of VHF Radio-Communication Action in the Ship-to-Shore Direction

M. S. Kozub

Testing centre “OMEGA”, Branch of the FSUE NIIR
29, Vakulenchuka st., Sevastopol, 299053, Russian Federation
gromozdin@niir.ru, ivlev@niir.ru, kozub@niir.ru, panina@niir.ru

Received: August 3, 2023

Peer-reviewed: September 15, 2023

Accepted: April 8, 2024

Abstract: The paper presents the methodology of predicting the boundary distance of radio communication of coastal GMDSS and vessel traffic control system objects operating in the VHF band in the ship-to-shore direction taking into account EMC. The methodology of estimation of EMC provision on the basis of using measured values of actual sensitivity as a criterion of EMC provision at a given normative range is presented.

Keywords: radio communication, VHF range, electromagnetic compatibility, actual sensitivity, boundary distance of radio communication action, signal-to-noise ratio, mutual interference in local grouping.

For citation (IEEE): M. S Kozub, “Consideration of the EMC in Determining the Distance of VHF Radio-Communication Action in the Ship-to-Shore Direction,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 67–80, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.05. (In Russ.).

References

- [1] Unified state system of information about the situation in the world's oceans. Navigation safety systems. URL: http://morinfocenter.ru/marine_safety_systems.asp. (In Russ.).
- [2] M. B. Protsenko, V. V. Gromozdin, and V. I. Kovalenko, “Main directions for improving full-scale testing of coastal objects and VTS and GMDSS centers”, *Proceedings of NIIR*, no. 1, pp. 63–68, 2019. (In Russ.).
- [3] IMO resolution A.803(19). Operational requirements for shipboard VHF radio installations providing radiotelephone communications and digital selective calling. URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.803\(19\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.803(19).pdf).
- [4] M. B. Protsenko, V. V. Gromozdin, K. V. Ievlev, and M. S. Kozub, “Instrumental methods for measuring the quality of ship VHF radio communications”, *Proceedings of NIIR*, no. 1. pp. 25–32, 2021. (In Russ.).
- [5] M. B. Protsenko, V. V. Gromozdin, and M. S. Kozub, “Methodology for estimating the limiting range of coastal radio stations SOBM in the VHF range for the shore-ship direction”, *Proceedings of NIIR*, no. 3, pp. 40–45, 2021. (In Russ.).

- [6] IMO Resolution A.801(19) “Provision of radio services for the Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS).” November 23, 1995.
URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.801\(19\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.801(19).pdf).
- [7] GOST R 55898-2013. Technical means of radio communication. Mutual radio interference in a local group. Calculation methods.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107802>. (In Russ.).
- [8] Recommendation ITU-R P.1546-6 “Prediction method for point-to-area paths for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz.”
URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-I!!PDF-R.pdf. (In Russ.).
- [9] Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 23, 2015 No. 226 “On approval of requirements for radar systems for ship traffic control, seaport infrastructure facilities necessary for the functioning of the global maritime distress communication system and for ensuring safety, facilities and means of an automatic information system, Shipping Control and Shipping Management Service.”
URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=261562>. (In Russ.).
- [10] M. B. Protsenko, V. V. Gromozdin, M. S. Kozub et al. “Methodology for full-scale testing of GMDSS A1 coastal objects”, *Elektrosvyaz*, no. 03. pp. 30–34, 2022.
- [11] M. B. Protsenko, V. V. Gromozdin, V. I. Kovalenko et al. “Features of full-scale testing of AIS under conditions of electromagnetic interference”, *Proceedings of NIIR*, no. 2. pp. 15–21, 2023.

Information about the author

Maxim S. Kozub, graduate student of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University. Head of scientific and technical testing dept. the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.

УДК 621.385.6

Способ генерации периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны

Тотьменинов Е. М., Конев В. Ю., Выходцев П. В.

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
просп. Академический, 2/3, 634055, г. Томск, Российская Федерация
totm@lfe.hcei.tsc.ru*

Получено: 26 апреля 2024 г.

Отрецензировано: 2 мая 2024 г.

Принято к публикации: 2 мая 2024 г.

Аннотация: Предложен и реализован способ генерации периодической последовательности мощных ультракоротких СВЧ-импульсов на основе режима сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны в течение одиночного импульса тока сильноточного релятивистского электронного пучка наносекундной длительности. На основе нестационарных численных кодов показано, что данный режим реализуется за счет введения отражений на концах замедляющей системы генератора. Работоспособность способа подтверждена экспериментально для частот генерации 10 GHz и 12 GHz. Получены режимы генерации ультракоротких (длительность около 1 ns) гигаваттных СВЧ-импульсов с периодом следования в единицы наносекунд (частота следования сотни мегагерц). Коэффициенты конверсии таких импульсов, определяемые как отношение пиковой СВЧ-мощности к мощности электронного пучка, достигали значений выше единицы. В эксперименте наблюдалась корреляция между импульсами последовательности и их строгая периодичность.

Ключевые слова: релятивистская лампа обратной волны, сверхизлучение, сильноточный электронный пучок, численное моделирование.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Тотьменинов Е. М., Конев В. Ю., Выходцев П. В. Способ генерации периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 81—92.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Тотьменинов, Е. М. Способ генерации периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны / Е. М. Тотьменинов, В. Ю. Конев, П. В. Выходцев // Информационные и радиоэлектронные технологии. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 81—92.

1. Введение

Интерес к режимам СВЧ-генерации в виде периодической последовательности ультракоротких импульсов (УКИ), длительность которых составляет несколько периодов колебаний, а частота следования сотни мегагерц, главным образом вызван работами по тематике электромагнитной совместимости электронных устройств. В ряде работ, например [1], было отмечено, что такое СВЧ-излучение может наиболее эффективно проникать в радиоэлектронную аппаратуру через ее приемные тракты. Другой возможной областью их применения может быть наносекундная радиолокация [2]. В последнее время в области мощной СВЧ-электроники разработаны и исследованы различные схемные решения, в которых реализуются такие режимы генерации вплоть до гигаваттного уровня выходной СВЧ-мощности. Это, например, конструкции [3, 4] с использованием комбинаций релятивистских ламп обратной (РЛОВ) и бегущей волны, в которых одна выступает в качестве активного элемента (усилитель), а другая как нелинейный насыщающийся поглотитель в цепи обратной связи. Альтернативный подход [5, 6], который описан в данной работе, основан на релятивистской лампе обратной волны (РЛОВ), работающей в режиме сверхизлучения [7]. Общим во всех конструкциях является наличие цепи обратной связи, которая задает период следования таких СВЧ-импульсов. При этом, поскольку в формировании каждого УКИ участвует предыдущий импульс, было теоретически предсказано [3, 5] и затем продемонстрировано в эксперименте [4] наличие корреляции между импульсами последовательности.

2. Блок схема генератора, результаты нестационарного численного моделирования

Принцип работы РЛОВ в режиме сверхизлучения основан на механизме накопительного отбора энергии у электронного пучка ультракоротким электромагнитным импульсом (импульсом сверхизлучения), зарождающимся на коллекторном конце прибора и затем распространяющимся навстречу невозмущенному электронному потоку. Отбор энергии осу-

ществляется за один проход. Упрощенная блок-схема генератора изображена на рис. 1. На выходе генератора расположен рефлектор, отражающий часть излучаемой СВЧ-мощности обратно в область замедляющей системы РЛОВ ($|R| < 1$), а на его коллекторном конце, где осаждается электронный пучок, осуществляется полное отражение ($|R| = 1$) падающей СВЧ-мощности в режиме короткого замыкания. Вначале анализ работы такой схемы был проведен с использованием простейшей нестационарной модели РЛОВ [5] в приближении ультрарелятивистских энергий электронного пучка ($\gamma \gg 1$, где γ — фактор Лоренца) и однонаправленного движения электронов, а затем на основе PIC-кода KARAT [8] с использованием модифицированной схемы генератора с целью вывода СВЧ-излучения в сторону коллектора электронов (рис. 2, 3). Здесь и далее используются следующие выражения: $K = P_{peak} / P_{beam}$ — коэффициент конверсии, который определяется как отношение мощности излучения, выводимой в нагрузку, к мощности электронного пучка;

$$C(t) = \int_0^{T_{rep}} A_1(t') A^*(t' - t) dt' / \sqrt{\int_0^{T_{rep}} |A_1(t')|^2 dt' * \int_t^{T_{rep}+t} |A(t')|^2 dt'} —$$

нормированная взаимная корреляционная функция $C(t)$ между первым (тестовым) импульсом $A_1(t)$ и полной последовательностью импульсов $A(t)$, где T_{rep} — период следования импульсов.

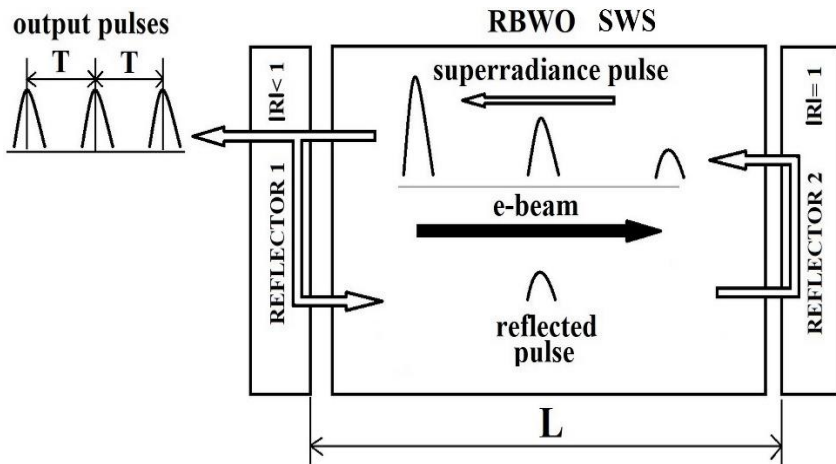


Рис. 1. Блок-схема генератора для получения последовательности УКИ на основе РЛОВ, работающей в режиме сверхизлучения. $|R|$ — модуль коэффициента отражения, SWS — замедляющая система.

Fig. 1. Block diagram of a generator for obtaining a sequence of ultrashort pulses based on radar, operating in superradiance mode. $|R|$ — reflection coefficient modulus, SWS — slowing system

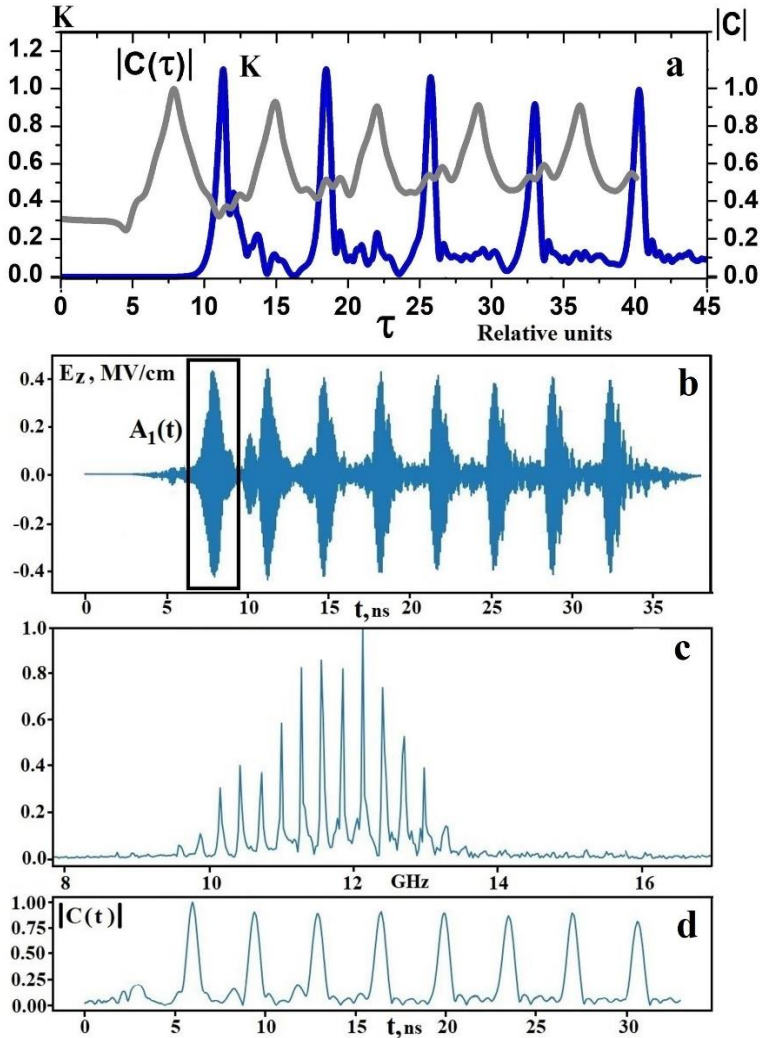


Рис. 2. Расчет с помощью простейшей нестационарной численной модели (а); расчет на основе PIC-кода KARAT: зависимость продольной компоненты ВЧ-электрического поля (E_z) от времени в сечении, расположенном на выходе из области расчета (b); спектр всей последовательности СВЧ-импульсов (c); огибающая модуля нормированной взаимной корреляционной функции (d).

Fig. 2. Calculation using the simplest non-stationary numerical model (a); calculation based on the KARAT PIC code: dependence of the longitudinal component of the HF electric field (E_z) on time in the section located at the exit from the calculation area (b); spectrum of the entire sequence of microwave pulses (c); envelope of the modulus of the normalized cross-correlation function (d)

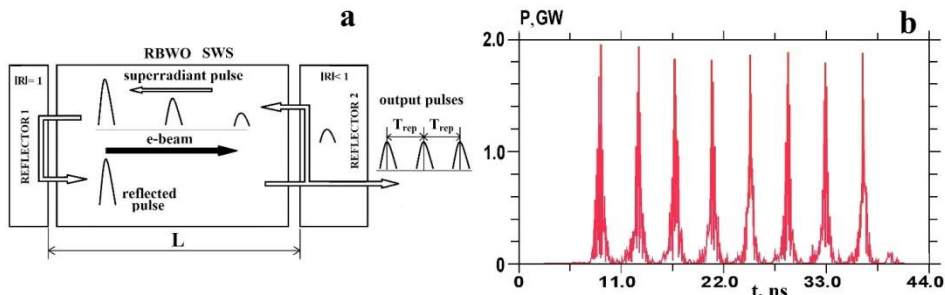


Рис. 3. Блок-схема генератора с выводом излучения в сторону коллектора электронов (а); пример 2,5-D моделирования генерации последовательности импульсов при токе электронного пучка 4.5 kA, ускоряющем напряжении 300 kV, длительности импульса тока 40 ns с фронтом 5 ns и ведущем магнитном поле 2.0 T (b). Частота следования импульсов 240 MHz, частота генерации $\approx 12,0$ GHz. Пиковые мощности УКИ около 1 GW, коэффициенты конверсии $K_{1-9} \approx 0,7$.

Fig. 3. Block diagram of a generator with radiation output towards the electron collector (a); an example of a 2.5-D simulation of the generation of a pulse sequence at an electron beam current of 4.5 kA, an accelerating voltage of 300 kV, a current pulse duration of 40 ns with a leading edge of 5 ns and a leading magnetic field of 2.0 T (b). Pulse repetition rate 240 MHz, generation frequency ≈ 12.0 GHz. Peak USP powers are about 1 GW, conversion factors $K_{1-9} \approx 0.7$

3. Экспериментальные результаты

Общий вид экспериментальной установки с системой СВЧ-регистрации, которая использовалась для тестирования генератора в разных режимах работы, представлены на рис. 4. В качестве высоковольтного источника применялся сильноточный импульсный генератор серии SINUS [9] с тройной формирующей линией (1), который производил импульсы напряжения с амплитудой до 330 kV и длительностью около 40 ns. Трубчатый релятивистский электронный пучок эмитировался с кромочного взрывоэмиссионного катода и формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией. Магнитное поле, транспортирующее пучок через электродинамическую систему СВЧ-генератора, создавалось соленоидом постоянного тока (2) с масляным охлаждением катушек. На выходе СВЧ-генератора устанавливался направленный ответвитель на основе круглого волновода (3). Для регистрации амплитуды и формы УКИ сигнал с ответвителя передавался на ламповый детектор и регистрировался осциллографом Tektronix TDS 7404 (4 GHz, 20 Gs/sec). В одном из экспериментов для регистрации радиосигналов с ответвителя дополнительно использовался осциллограф Keysight (Agilent) UXR0134A (13 GHz, 128 Gs/sec). Вывод СВЧ-излучения в открытое пространство производился через конический рупор (4) с диаметром выходного окна 200 mm. Высокочастотная кабель-

ная трасса для передачи детектированных СВЧ-сигналов калибровалась с помощью генератора Г5-84, который формировал видеоимпульсы с длительностью около 1 ns . Для передачи радиосигналов использовался высокочастотный кабель серии КС20А-13-13 длиной 6 m в комплексе с линейкой высокочастотных аттенуаторов.

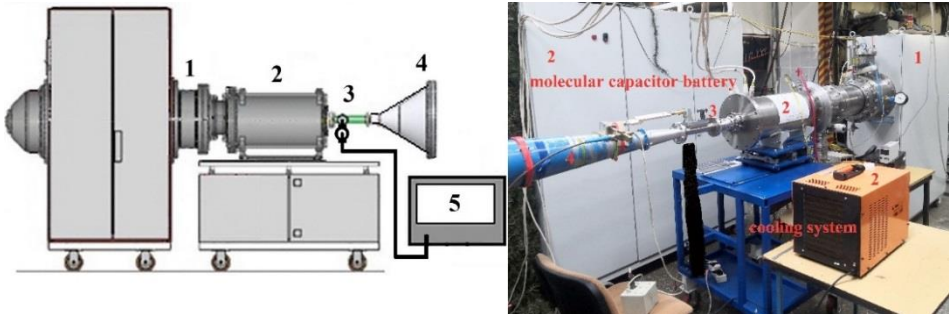


Рис. 4. Экспериментальная установка с системой СВЧ-регистрации: 1 — высокопоточный импульсный генератор *SINUS* с тройной формирующей линией, 2 — соленоид с системой охлаждения и батареей молекулярных конденсаторов, 3 — направленный волноводный ответвитель с ламповым детектором, 4 — излучающий рупор, 5 — осциллограф.

Fig. 4. Experimental setup with a microwave recording system: 1 – high-current *SINUS* pulse generator with a triple shaping line, 2 – solenoid with a cooling system and a battery of molecular capacitors, 3 – directional waveguide coupler with a lamp detector, 4 – emitting horn, 5 – oscilloscope

3.1. Экспериментальный макет генератора № 1 (частота генерации 10 GHz , режим одиночного срабатывания ускорителя электронов)

При амплитуде напряжения на вакуумном диоде ускорителя электронов 270 kV , токе пучка 4.0 kA и ведущем магнитном поле 2.2 T получен режим генерации периодической последовательности УКИ (рис. 5) с длительностью на полувысоте $\approx 0.8\text{ ns}$ и частотой следования 170 MHz (период следования 5.9 ns) [6]. Такой период следования импульсов соответствует периоду обратной связи в генераторе, оцениваемому как $T = L(1/v_{gr} + 1/v_e)$ где v_e — скорость электронов в пучке, v_{gr} — групповая скорость встречной электромагнитной волны, L — длина системы (рис. 3). Центральная частота колебаний в каждом УКИ около 10 GHz . Измерения пиковой мощности УКИ с помощью направленного волноводного ответвителя, сигнал с которого поступал на ламповый детектор и обрабатывался с учетом вольт-ваттной характеристики этого детектора, дали следующие оценки: $P_1 \approx 1.4\text{ GW}$, $P_2 \approx 1.0\text{ GW}$, $P_3 \approx 1.1\text{ GW}$, $P_4 \approx 1.1\text{ GW}$, $P_5 \approx 0.8\text{ GW}$, $P_6 \approx 0.3\text{ GW}$. Коэффициенты конверсии, определяемые как

отношение пиковой мощности каждого УКИ к мощности электронного пучка в момент времени обозначенный треугольником на рис. 5, составили: $K_1 \approx 1,3$, $K_2 \approx 0,9$, $K_3 \approx 1,0$, $K_4 \approx 0,9$, $K_5 \approx 0,7$, $K_6 \approx 0,3$.

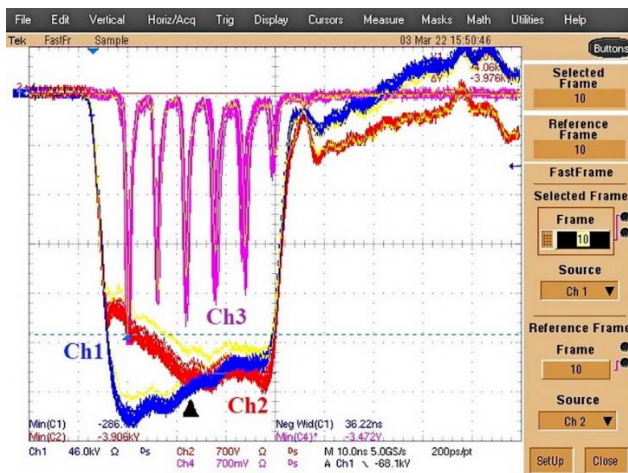


Рис. 5. Осциллограммы, зарегистрированные за 20 последовательных срабатываний ускорителя: *Ch1* — напряжение на вакуумном диоде, *Ch2* — ток вакуумного диода, *Ch3* — детектированный СВЧ-сигнал с волноводного ответвителя. Параметры электронного пучка в момент времени, выделенный треугольником: ускоряющее напряжение 270 kV, ток 4.0 kA.

Fig. 5. Oscillograms recorded for 20 consecutive operations of the accelerator: *Ch1* – voltage on the vacuum diode, *Ch2* – current of the vacuum diode, *Ch3* – detected microwave signal from the waveguide coupler. Parameters of the electron beam at the time indicated by the triangle: accelerating voltage 270 kV, current 4.0 kA

3.2. Экспериментальный макет генератора № 2 (частота генерации 12 GHz, импульсно-периодический режим работы ускорителя электронов)

При амплитуде напряжения на вакуумном диоде 300 kV, токе пучка 3.8 kA и ведущем магнитном поле 1.8 T получен режим генерации периодической последовательности УКИ (рис. 6) с длительностью по половинному уровню пиковой мощности около 1 ns и частотой следования около 240 MHz (период следования около 4.0 ns). Оценки пиковой мощности УКИ в измерениях с помощью волноводного ответвителя и лампового детектора составили: первый — $P_1 \approx 0,23$ GW, второй — $P_2 \approx 0,35$ GW, третий — $P_3 \approx 0,48$ GW, четвертый — $P_4 \approx 0,56$ GW, пятый — $P_5 \approx 0,53$ GW, шестой — $P_6 \approx 0,48$ GW, седьмой — $P_7 \approx 0,51$ GW, восьмой — $P_8 \approx 0,35$ GW. Соответствующие коэффициенты конверсии (для момента времени обозначенного треугольником): $K_{1-8} \approx 0,2—0,5$.

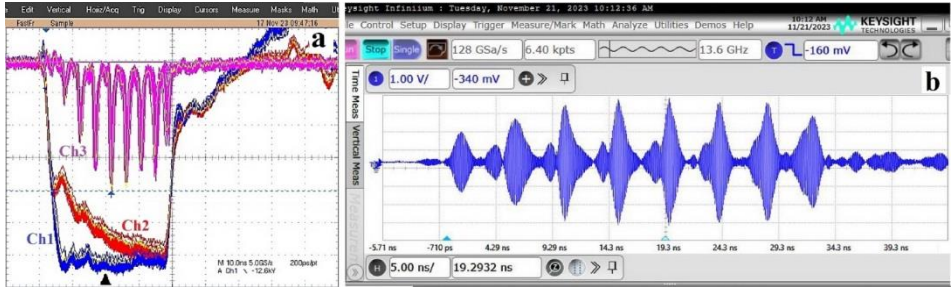


Рис. 6. Осциллограммы, полученные в режиме накопления за 30 последовательных срабатываний ускорителя электронов, работающего в режиме с частотой повторения 30 Гц (а); типичная одиночная осциллограмма последовательности радиосигналов (б).

Fig. 6. Oscillograms obtained in the accumulation mode for 30 consecutive operations of an electron accelerator operating in a mode with a repetition rate of 30 Hz (a); typical single waveform of a radio signal sequence (b)

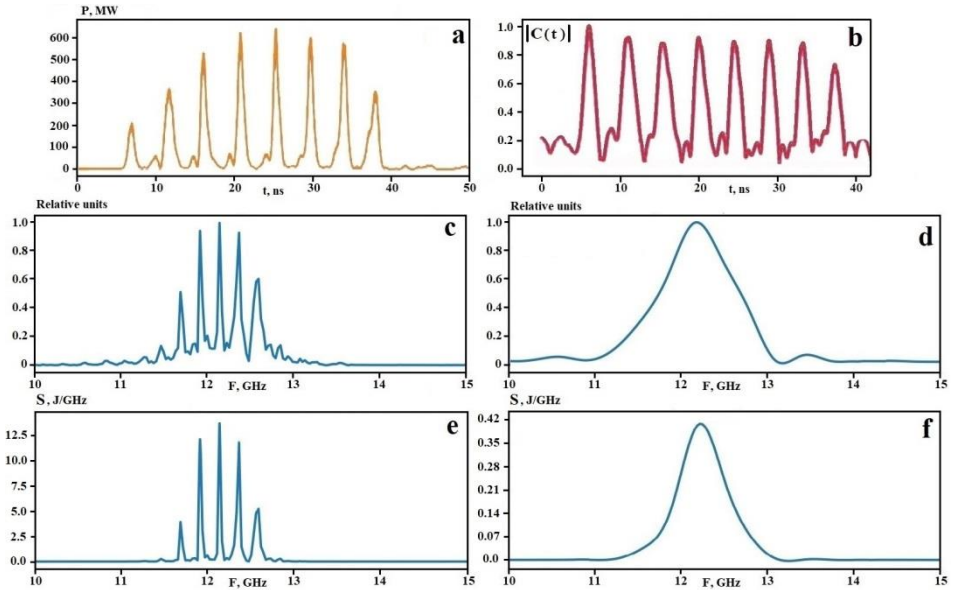


Рис. 7. Поведение усредненной за период колебания ($T_{osc}=1/F_{gen}$) мощности генерации во времени (а); огибающая модуля нормированной взаимной корреляционной функции (б); спектры всей последовательности УКИ (с) и импульса, имеющего максимальную амплитуду (д); спектральные плотности энергии всей последовательности УКИ (е) и импульса, имеющего максимальную амплитуду (ф).

Fig. 7. Behavior of generation power averaged over the period of oscillation ($T_{osc}=1/F_{gen}$) over time (a); envelope of the modulus of the normalized cross-correlation function (b); spectra of the entire USP sequence (c) and the pulse with the maximum amplitude (d); spectral energy densities of the entire USP sequence (e) and the pulse having the maximum amplitude (f)

Результаты обработки последовательности радиосигналов из рис. 6b, в том числе с помощью корреляционной функции $C(t)$ и преобразования Фурье, представлены на рис. 7.

Равные частотные интервалы $\Delta F \approx 0,24 \text{ GHz}$ (рис. 7c) между спектральными линиями свидетельствуют о строгой периодичности следования СВЧ-импульсов ($T_{\text{rep}} \approx 4 \text{ ns}$). Центральная частота колебаний в каждом УКИ около 12.0 GHz (рис. 7d).

4. Заключение

Важнейшим результатом проведенных работ является экспериментальное подтверждение способа генерации периодической последовательности УКИ гигаваттного уровня СВЧ-мощности и корреляции между импульсами последовательности. Кроме того, наблюдавшееся относительно небольшое снижение пиковой мощности таких импульсов к концу последовательности может свидетельствовать о существовании ресурса для дальнейшего увеличения их числа в последовательности, как за счет перехода в более высокочастотный диапазон, так и за счет увеличения длительности импульса тока электронного пучка.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (тема № FWRM-2021-0002).

Благодарности

Авторы выражают благодарность К. О. Селявскому и С. А. Кицанову за помощь при проведении экспериментальной части работы. Отдельная благодарность центру коллективного пользования ТУСУРа «Импульс» за предоставленный осциллограф *Keysight (Agilent) UXR0134A* для проведения спектральных измерений. Авторы также выражают благодарность д. ф.-м. н. И. В. Пегель за полезные замечания и внимание к работе.

Список литературы

1. Боев С. Ф., Пименов П. Н., Пронин С. А., Шевырев А. В. Влияние параметров сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения на функционирование радиоэлектронных средств // Труды МАИ. 2017. Вып. 93. С. 20.
2. Бадулин Н. Н., Бацула А. П., Губанов В. П. и др. Радиолокатор с наносекундным зондирующим импульсом // Приборы и техника эксперимента. 1998. Т. 41, № 6. С. 111—114.
3. Гинзбург Н. С., Абубакиров Э. Б., Вилков М. Н. и др. Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке связанных релятивистских ламп обратной и бегущей волн, работающих в режимах усиления и нелинейного компфнеровского подавления // ЖТФ. 2018. Т. 88, вып. 8. С. 1241—1247.

4. Ginzburg N.S., Samsonov S.V., Denisov G.G. et al. Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber // *Phys. Rev. Applied*. 2021. Vol. 16, no. 5. 7 p.
5. Тотъменинов Е. М., Ростов В. В. Генерация последовательности мощных ультракоротких микроволновых импульсов на основе эффекта сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны с отражателями на концах пространства взаимодействия // *Письма в ЖТФ*. 2021. Т. 47, вып. 1. С. 51—54.
6. Тотъменинов Е. М., Конев В. Ю., Климов А. И., Пегель И. В. Экспериментальная реализация способа генерации последовательности ультракоротких гигаваттных импульсов черенковского сверхизлучения с наносекундным периодом следования // *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 115, № 7-8. С. 479—483.
7. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Ростов В. В. и др. Черенковское сверхизлучение с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка // *Письма в ЖЭТФ*. 2003. Т. 77, вып. 6. С. 314—318.
8. Тараканов В. П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М. : Наука, 2003. 477 с.
9. Mesyats G. A., Korovin S. D., Gunin A.V. et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines // *Laser and Particle Beams*. 2003. Vol. 21. P. 197—209.

Информация об авторах

Тотъменинов Евгений Маркович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)», г. Томск, Российская Федерация.

Конев Владимир Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)», г. Томск, Российская Федерация.

Выходцев Павел Васильевич, научный сотрудник ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)», г. Томск, Российская Федерация.

The Method of Generation of a Periodic Sequence of Ultrashort Gigawatt Pulses with a Nanosecond Repetition Period in the Superradiance Mode of a Relativistic Backward Wave Oscillator

E. M. Totmeninov, V. Yu. Konev, and P. V. Vykhodtsev

*Institute of High Current Electronics, SB RAS
Academicheskyy ave., 2/3, 634055, Tomsk, Russian Federation
totm@lfe.hcei.tsc.ru*

Received: April 26, 2024
Peer-reviewed: May 2, 2024
Accepted: May 2, 2024

Abstract: A method for generating a periodic sequence of powerful ultrashort microwave pulses based on the superradiant mode of a relativistic backward wave oscillator during one pulse of a current of a high-current relativistic electron beam of nanosecond duration is proposed and implemented. Based on non-stationary numerical codes, it is shown that this mode is implemented by introducing reflections at the ends of the system of decelerating generators. The effectiveness of the method has been confirmed experimentally for generation frequencies of 10 GHz and 12 GHz. The modes of generation of ultrashort (duration about 1 ns) gigawatt microwave pulses with a repetition period in units of nanoseconds (repetition frequency of hundreds of megahertz) are obtained. The conversion coefficients of such pulses, defined as the ratio of the peak power of microwave radiation to the power of the electron beam, reached values above one. In the experiment, a correlation was observed between the sequence of pulses and their strict periodicity.

Keywords: relativistic backward wave oscillator, superradiant mode, high current electronic beam, numerical simulation.

Sources of financing: The work was funded within the framework of the State Assignment by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Institute of High Current Electronics SB RAS (FWRM-2021-0002).

For citation (IEEE): E. M. Totmeninov, V. Yu. Konev, and P. V. Vykhodtsev, "The Method of Generation of a Periodic Sequence of Ultrashort Gigawatt Pulses with a Nanosecond Repetition Period in the Superradiance Mode of a Relativistic Backward Wave Oscillator," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 81–92, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.06. (In Russ.).

References

- [1] S. Boev, P. Pimenov, S. Pronin, and A. Shevyrev, "The Influence of Parameters of the Ultra-Short Pulse of Electromagnetic Radiation on the Functioning of Radio-Electronic Devices," *Trudy MAI*, no. 93, 20 p. (In Russ.).

- [2] N. N. Badulin, A. P. Batsula, A. I. Mel'nikov et al. "A Radar with a Nanosecond Sounding Puls," *EInstruments and Experimental Techniques*, 1998. vol. 41, no. 6, pp. 847–849.
- [3] N. S. Ginzburg, E. B. Abubakirov, M. N. Vilkov, et al. "Generation of a Periodic Sequence of High-Power Ultrashort Pulses in a Chain of Coupled Backward-Wave and Traveling-Wave Tubes Operating in the Regimes of Amplification and Nonlinear Kompfner Suppression," *Tech. Phys.*, vol. 63, pp. 1205–1211, (2018), doi: 10.1134/S1063784218080078.
- [4] N. S. Ginzburg, S. V. Samsonov, G. G. Denisov et al. "Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber," *Phys. Rev. Applied*, vol. 16, iss. 5, pp. 054045, 2021, doi: 10.1103/PhysRevApplied.16.054045.
- [5] E. M. Totmeninov and V. V. Rostov, "Generation of a sequence of powerful ultrashort microwave pulses based on the effect of superradiance of a relativistic back-ward wave oscillator with reflectors at the ends of the interaction space," *Technical Physics Letters*, vol. 47, no. 1, pp. 46–49, 2021, doi: 10.21883/PJTF.2021.01.50460.18527.
- [6] E. M. Totmeninov, V. Y. Konev, A. I. Klimov et al. "Experimental Implementation of the Method of Generation of a Sequence of Ultrashort Gigawatt Cherenkov Superradiance Pulses with a Nanosecond Repetition Period," *Jetp Lett.*, vol. 115, pp. 444–448, 2022, doi: 10.1134/S0021364022100356.
- [7] A. A. El'chaninov, S. D. Korovin, V. V. Rostov et al. "Cherenkov superradiance with a peak power higher than electron flow power," *Jetp Lett.*, vol. 77, pp. 266–269, 2003, doi: 10.1134/1.1577754.
- [8] V. P. Tarakanov, *Mathematical modeling. Problems and results*. M.: Nauka, 2003. (In Russ.).
- [9] G. A. Mesyats, S. D. Korovin, A. V. Gunin et al. "Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines," *Laser Part. Beams*, vol. 21, pp. 197–209, 2003, doi: 10.1017/S0263034603212076.

Information about the authors

Eugene M. Totmeninov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, researcher of the FSBSI "Institute of High Current Electronics SB RAS", Tomsk, Russian Federation.

Vladimir Yu. Konev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher of the FSBSI "Institute of High Current Electronics SB RAS", Tomsk, Russian Federation.

Pavel V. Vykhodtsev, researcher of the FSBSI "Institute of High Current Electronics SB RAS", Tomsk, Russian Federation.

УДК 654.026

Разработки в области подводной беспроводной оптической связи и с помощью малогабаритных магнитных антенн

Широков И. Б., Головин В. В., Редькина Е. А.,
Сердюк И. В., Овчаров П. П.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
shirokov@ieee.org

Получено: 22 апреля 2024 г.

Отрецензировано: 29 апреля 2024 г.

Принято к публикации: 29 апреля 2024 г.

Аннотация: В статье представлены результаты разработки прототипа приемо-передающего модуля подводной беспроводной оптической системы передачи данных. Выбрана актуальная компонентная база. Разработан прототип модуля с учетом требуемого форм-фактора. Проведены испытания в беспроводном воздушном канале связи. Представлены результаты исследования подводного беспроводного канала связи, реализованного с применением малогабаритных всенаправленных рамочных магнитных антенн. Разработаны и изготовлены прототипы антенн, выполнены измерения по передаче данных с их применением в пресной и морской воде. Показана потенциальная возможность организации с применением магнитных антенн широкополосного подводного беспроводного канала связи протяженностью до 100 метров и более.

Ключевые слова: подводная беспроводная связь, беспроводная оптическая связь, беспроводная магнитно-индукционная связь, магнитные антенны, приемо-передающий оптический модуль.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Головин В. В., Редькина Е. А. и др. Разработки в области подводной беспроводной оптической связи и с помощью малогабаритных магнитных антенн // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 93—105.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Широков, И. Б. Разработки в области подводной беспроводной оптической связи и с помощью малогабаритных магнитных антенн / И. Б. Широков, В. В. Головин, Е. А. Редькина и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 93—105.

1. Введение

В современных телекоммуникационных системах для организации беспроводной подводной связи применяют следующие несколько подходов.

Акустическая подводная связь (*UAWC*), которая считается самым популярным методом подводной беспроводной связи, так как затухания под водой акустических волн составляют 0,1—4 дБ/км. К недостаткам относятся низкая скорость распространения акустических волн (1500 м/с) и ограниченная полоса пропускания *UAWC* (кГц), что приводит к явлению многолучевости, большой временной задержке и громоздким акустическим антеннам [1].

Подводная радиосвязь (*URWC*) позволяет организовать высокоскоростную передачу данных на небольших расстояниях. На электромагнитные волны влияют температура, соленость и глубина, что приводит к сильному ослаблению электромагнитных волн и ограничивает дальность распространения сигнала в воде. Благодаря высокой электропроводности воды на СВЧ трудно реализовать *URWC* на трассах протяженностью более 10 м [2] в диапазонах метровых и более коротких волн (в диапазоне 2,4 ГГц затухания радиоволн в соленой воде составляют около 169 дБ/м), при этом требуется большая мощность передатчиков (более 100 Вт) [3]. В диапазонах ДВ (30—300 кГц) и СДВ (3—30 кГц) ослабление электромагнитной волны может рассматриваться как достаточно низкое, чтобы обеспечить надежную связь на расстоянии многих километров. *URWC* диапазона ДВ применяются в подводных военных системах или при создании линий связи между наземными и подводными объектами [4]. К основным недостаткам таких систем относятся сложные требования к конструкции очень больших антенн и низкие скорости передачи данных.

Подводная связь с помощью магнитной индукции (*UWMIC*) как многообещающая замена традиционных акустических систем и радиосвязи привлекла значительное внимание [5]. Это объясняется присущими ей качественными амплитудно-частотной характеристикой канала, малой задержкой распространения и относительно небольшим потреблением энергии [6]. Предполагается переход от традиционных однонаправленных антенн к широконаправленным *MI*-антеннам. Существует также большой исследовательский интерес к имеющимся в настоящее время подходам к расширению или повторному использованию доступных полос частот для увеличения пропускной способности подводного канала *MI* [5].

Подводная оптическая связь (*UOWC*) основана на использовании видимого участка оптического спектра. *UOWC* характеризуется большой доступной полосой пропускания, что позволяет реализовать высокие ско-

рости передачи данных, обладает преимуществами низкого энергопотребления, низкой стоимости и компактных размеров [7]. Сложная подводная среда оказывает серьезное влияние на распространение света под водой. Поглощение, рассеяние и турбулентность являются доминирующими вредными эффектами, которые ухудшают характеристики оптической передачи при низких температурах. Подводная передача оптических волн в полосе 450—500 нм (синий и зеленый) имеет наименьшее затухание для чистой морской воды или прозрачного океана (0,4 дБ/м) по сравнению с другими полосами, в этой полосе ограничен эффект ослабления, вызванный взаимодействием фотонов с молекулами воды и другими частицами. Полоса 520—570 нм (желто-зеленая) подходит для прибрежных океанских или мутных портовых вод (11 дБ/м).

В данной статье представлены результаты разработки приемопередающего модуля для организации беспроводной оптической связи, совместимого на входе с интерфейсом RS-232. Также представлены результаты исследования беспроводного подводного канала связи, организованного с применением малогабаритных магнитных антенн, экспериментально показана возможность обеспечить высокую информационную емкость канала связи на трассе протяженностью десятки—сотни метров.

2. Приёмо-передающий модуль подводной беспроводной оптической системы передачи данных

В статье [8] нами были представлены результаты разработки передающего оптического модуля на основе переключателей с TTL-логикой и приемного оптического модуля на основе двух вариантов операционного усилителя OPA855 с полосой пропускания 8 ГГц. Для беспроводного оптического канала протяженностью до 1 м произведен сравнительный анализ временных параметров переданных последовательностей электрических импульсов со скважностью 2 и с частотой 1 МГц при использовании различных светоизлучающих диодов (*BL-L524UBC*, *BL-L522UBC*, *BL-L502UBC*, *FYL-5013UBC*, *NL-5013UBC*, *GNL-5053UBC*, *GNL-5053UBC-TL*, *GN2-5013BGC*, *BL-L563UBC*) и *pin*-фотодиодов (*BPX 65*, *BPW24R*, ФД-263-01). Полученные при этом результаты позволили подобрать комплементарную пару светодиода и фотодиода, выявить ряд схемотехнических особенностей, в том числе касающихся реализации источника питания и реализовать электрические принципиальные схемы для приемного и передающего блоков разрабатываемого прототипа. На рис. 1 показана электрическая принципиальная схема платы передающего оптического модуля на основе восьмиканального драйвера LED — *MBI516 (DD1)*. На входы DD1 3, 4 и 13

подаются сигналы запуска (*LE*), синхронизации (*CLK*) и передаваемые данные (*DI*). В каждом из каналов управления *MBI516* последовательно включено по 3 *LED BL-L502UBC* с длиной волны излучения 470 нм.

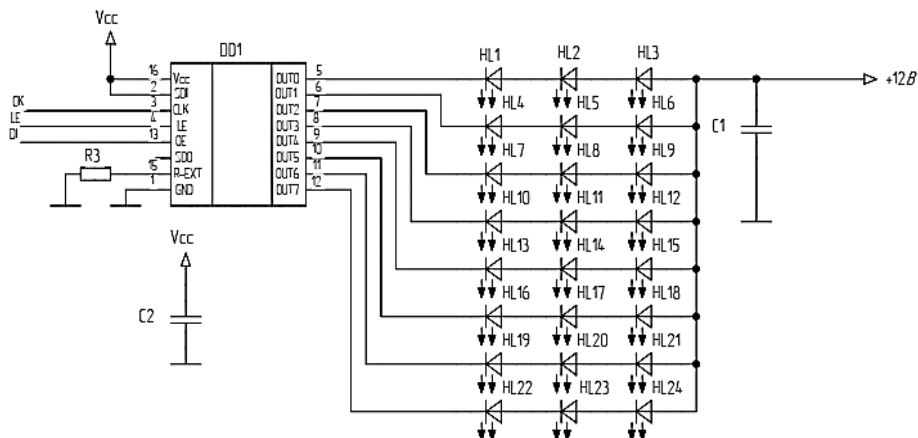


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема платы передающего оптического модуля.

Fig. 1. Electrical circuit diagram of the transmitting optical module board

На рис. 2 показана электрическая принципиальная схема платы приемного оптического модуля с *pin*-фотодиодом (*HL1*) ФД-263-01. Усиление реализовано на операционных усилителях *DA6* (микросхема *LTC6268*) и *DA1 A, B* (микросхема *MP2307*), на выходе которых высокоскоростной компаратор *DA2* (микросхема *MAX913*) восстанавливает форму импульсов в принятой последовательности данных.

Реализация программного обеспечения передающего и приемного модуля системы беспроводной оптической подводной передачи данных основывается на приеме информационной последовательности по протоколу *RS-232* с последующим преобразованием сигнала в оптическую последовательность с модуляцией *PPM* таким образом, что информационная логическая единица заменяется четырьмя битами 0010, а логический ноль — 0100.

Стартовая и стоповая оптическая последовательность — 1000. Отладка работы программы осуществлялась на отладочных платах *cyclone 4* с эмуляцией различных последовательностей на передаче с дешифрацией на приеме и отображением результатов передачи на ПК, а также на семи-сегментном индикаторе платы, как показано на рис. 3.

Разработан прототип приемо-передающего модуля подводной беспроводной оптической связи (ППМ-БПОС), рис. 4.

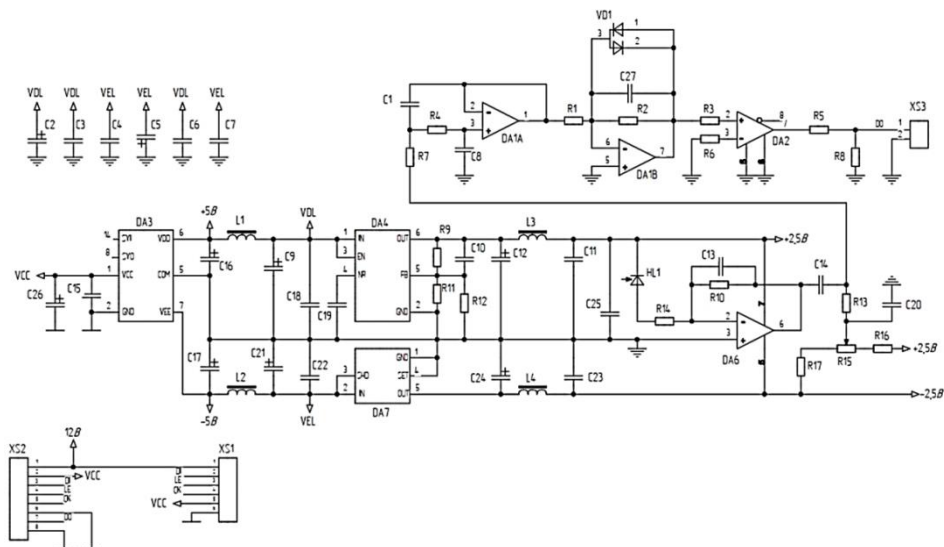


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема платы приемного оптического модуля.

Fig. 2. Electrical circuit diagram of the receiving optical module board

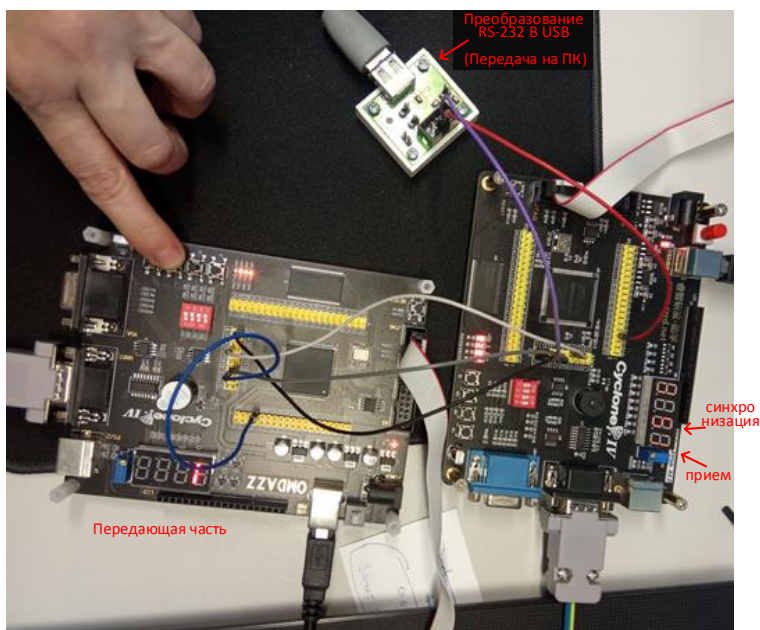


Рис. 3. Результат передачи отладочной единичной последовательности.

Fig. 3. Result of transmitting the debug single sequence

В состав ППМ-БПОС входят модули:

- передающий модуль (рис. 5, а);
- приемный модуль (рис. 5, б);
- модуль цифровой обработки сигналов (рис. 5, с).

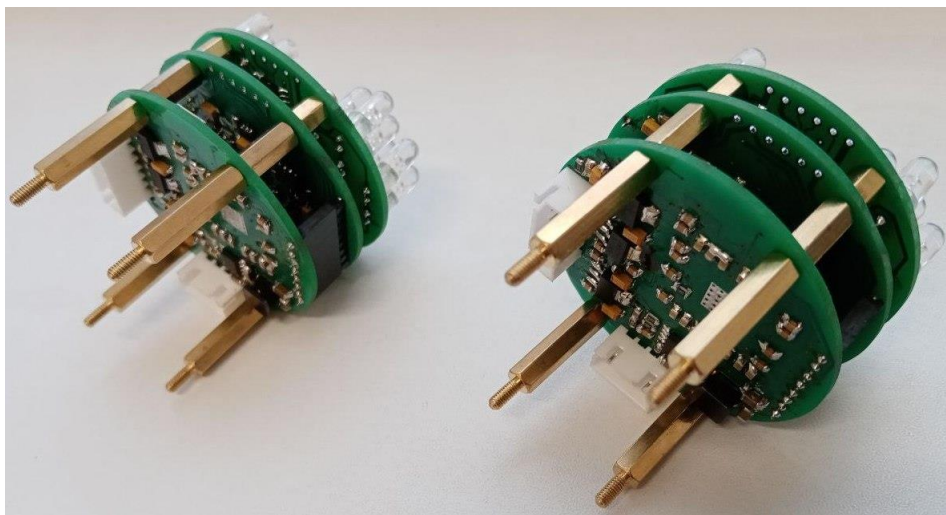


Рис. 4. Прототип приемно-передающего модуля беспроводной оптической связи.

Fig. 4. Prototype wireless optical communication transceiver module

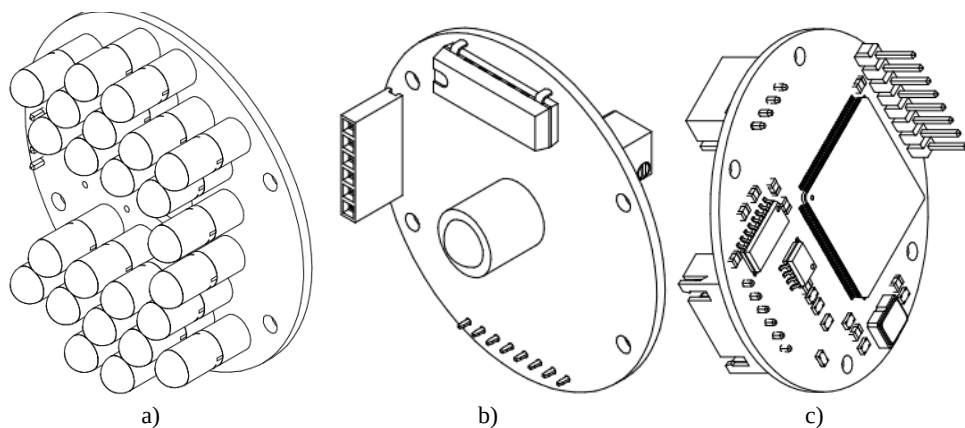


Рис. 5. Состав ППМ-БПОС: передающий модуль (а), приемный модуль (б) и модуль цифровой обработки сигналов (в).

Fig. 5. Composition of a wireless optical communication transceiver module: transmitting module (a), receiving module (b) and digital signal processing module (c)

Внешний вид ППМ-БПОС, размещенный в водонепроницаемом металлическом корпусе, работающий в режиме передачи данных, показан на рис. 6.

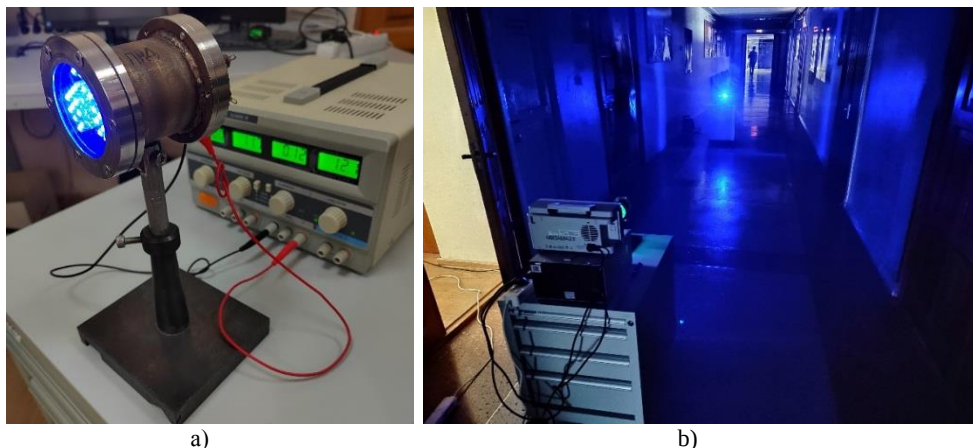


Рис. 6. Внешний вид ППМ-БПОС в водонепроницаемом металлическом корпусе (а) и измерительная установка в сборе (б).

Fig. 6. Appearance of the wireless optical communication transceiver module in a waterproof metal case (a) and the assembled measuring setup (b)

Испытания проводились при протяженности воздушного канала от 1,5 до 7 м. Для трассы длиной 9 м получены следующие осциллограммы на приемном модуле, показанные на рис. 7.

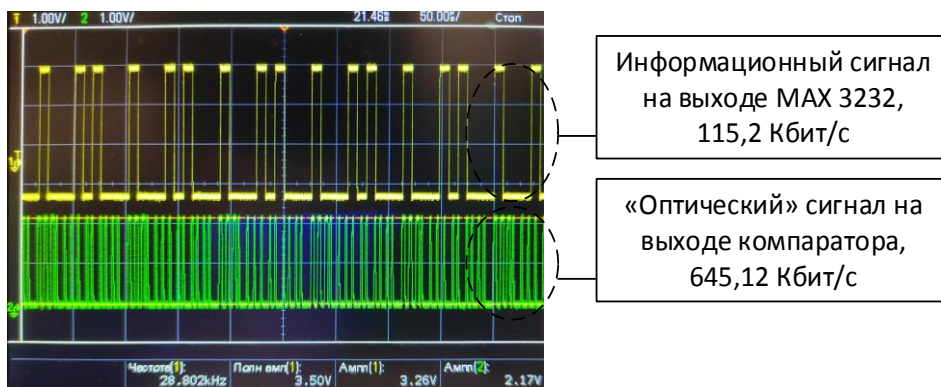
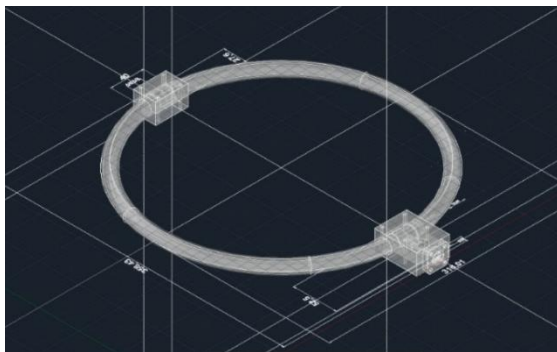


Рис. 7. Осциллограммы на выходе приемного тракта ППМ-БПОС при протяженности трассы 7 м.

Fig. 7. Oscillograms at the output of the receiving path of the wireless optical communication transceiver module with a path length of 7 m

3. Исследование подводного беспроводного канала связи, реализованного с помощью магнитной индукции

Разработан прототип магнитной антенны МА-01, представленный на рис. 8.



a)



b)

Рис. 8. Аксонометрия корпуса МА-01 (a) и испытательные образцы МА-01 (b).

Fig. 8. Axonometry of the MA-01 body (a) and MA-01 test samples (b)

Исследования прототипа беспроводного канала связи на основе магнитных антенн проводился в бассейне испытательной лаборатории СевГУ. Схема измерительной установки представлена на рис. 9. В измерительную установку входило следующее измерительное оборудование: генератор сигналов *SFG-2004*; осциллограф *DSOX1102G*; селективный милливольтметр.

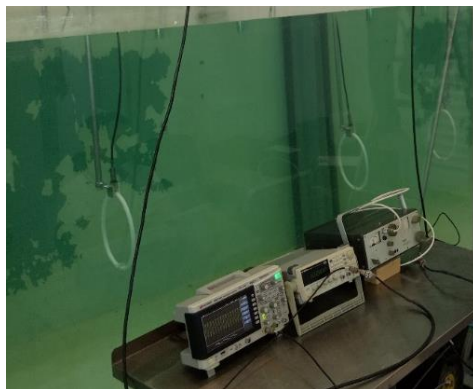


Рис. 9. Измерительная установка для исследования прототипа беспроводной системы связи на основе магнитных антенн в пресной воде.

Fig. 9. Measuring stand for studying a prototype wireless communication system based on magnetic antennas in fresh water

На основании проведенных измерений установлено, что характер резонанса контуров магнитных антенн выше 1,58 МГц — двугорбый — и в воде, и на воздухе, но в воде в присутствии стального бассейна особо выражен на 6,3 МГц.

Исходя из значений затухания магнитного поля на расстоянии до 2 метров (–55...–60 дБ) при несогласованных магнитных антеннах, можно сделать вывод о возможности реализации канала связи в диапазоне частот 1—5, 10—15 МГц на расстоянии до 10—100 м. Результаты измерения в бассейне показывают существенное влияние его конструктивных элементов.

В ходе исследования характеристик прототипа беспроводного канала связи на основе магнитных антенн был проведен эксперимент в морской воде в одной из бухт Севастополя.

Испытательная установка, как показано на рис. 10, включала генератор сигналов и селективный милливольтметр.

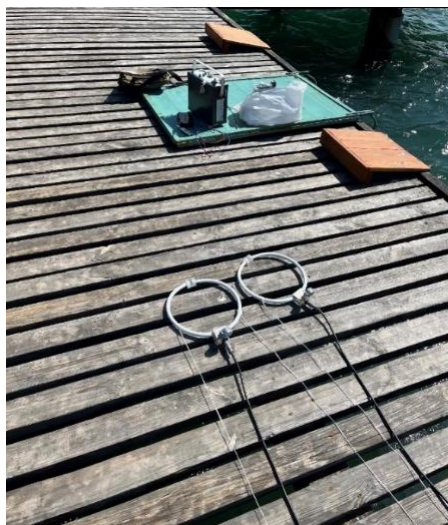


Рис. 10. Условия испытания прототипа беспроводного канала связи на основе магнитных антенн в морской воде.

Fig. 10. Test conditions for a prototype wireless communication channel based on magnetic antennas in sea water

Расстояние между антеннами составляло 4 м, глубина погружения 2 м, расположение генератора и селективного милливольтметра над уровнем моря — 1 м. Уровень сигнала на генераторе составил 20 В. Результаты измерения показали, что уровень сигнала (затухание) на расстоянии 4 м согласуется с полученными результатами в пресной воде.

4. Заключение

Разработан прототип приемо-передающего модуля для организации подводной оптической беспроводной связи. Разработано программное обеспечение для приема-передачи информационной последовательности по протоколу RS-232 с преобразованием сигнала в беспроводном канале в оптическую последовательность с позиционно-импульсной модуляцией. Проведены успешные испытания в бассейне по передаче данных под водой по беспроводному оптическому каналу со скоростью 115,2 кбит/с согласно протокола RS-232. Разработаны прототипы магнитных антенн для организации беспроводного канала связи. Проведены испытания в бассейне и в море, которые подтвердили возможность организации протяженного подводного высокоскоростного канала передачи данных с применением магнитных антенн.

Список литературы

1. Zeng Z., Fu S., Zhang H. et al. A survey of underwater optical wireless communications // IEEE Commun. Surv. and Tutorials. 2017. Vol. 19, no. 1. P. 204–238.
2. Gussen C. M., Diniz P. S. R., Campos M. L. R. et al. A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies // Inf. Sys. 2016. Vol. 31, no. 1. P. 242–255.
3. Al-Shamma'a A. I., Shaw A., and Saman S. Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater // IEEE T. Antennas Propag. 2004. Vol. 52, no. 11. P. 2843–2849.
4. Clam L. Extremely Low Frequency Transmitter Site Clam Lake. The United State Navy. Navy fact file. Tech. Rep., Wisconsin, 2001.
URL: https://nuke.fas.org/guide/usa/c3i/fs_clam_lake_elf2003.pdf, access data 09.08.2023.
5. Li Y., Wang S., Jin C. et al. A Survey of Underwater Magnetic Induction Communications : Fundamental Issues, Recent Advances, and Challenges. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2019. Vol. 21, iss. 3. P. 2466–2487.
6. Arunkumar K. and Murthy C. R. Soft Symbol Decoding in Sweep-Spread-Carrier Underwater Acoustic Communications: A Novel Variational Bayesian Algorithm and Its Analysis // IEEE Trans. Signal Process. 2020. Vol. 68. P. 2435–2448.
7. Shirokov I. B., Golovin V. V., Redkina E. A. et al. Practical aspects of design of the wireless underwater optical communication system for telecommunication applications // RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology. 2024. Vol. 16, no. 1. P. 31–42.
8. Широков И. Б., Головин В. В., Редькина Е. А. и др. Структура и оптическая компонентная база приемо-передающего модуля для организации подводной оптической беспроводной системы передачи данных. Журнал радиоэлектроники. 2024. № 1. 16 с.
URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.7>.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Головин Владислав Викторович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Редькина Елена Александровна, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-8840-9550.

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Овчаров Павел Петрович, старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Developments in the Field of Underwater Wireless Optical Communication and Using Small-Sized Magnetic Antennas

I. B. Shirokov, V. V. Golovin, Ye. A. Red'kina,
I. V. Serdyuk, and P. P. Ovcharov

Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, Russian Federation, 299053
shirokov@ieee.org

Received: April 22, 2024
Peer-reviewed: April 29, 2024
Accepted: April 29, 2024

Abstract: The article presents the results of the development of a prototype receiving and transmitting module for an underwater wireless optical data transmission system. The current component base has been selected. A prototype of the module has been developed taking into account the required form factor. Tests were carried out in the wireless air communication channel. The results of a study of an underwater wireless communication channel implemented using small-sized omnidirectional loop magnetic antennas are presented. Antenna prototypes have been developed and manufactured, data transmission measurements have been performed with their application in fresh and seawater. The potential possibility of organizing a broadband underwater wireless communication channel with a length of up to 100 meters or more using magnetic antennas is shown.

Keywords: underwater wireless communication, wireless optical communication, wireless magnetic induction communication, magnetic antennas, receiving and transmitting optical module.

For citation (IEEE): I. B. Shirokov, V. V. Golovin, Ye. A. Red'kina et al. "Developments in the Field of Underwater Wireless Optical Communication and Using Small-Sized Magnetic Antennas," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 93–105, 2024, doi: 10.xxxx/2587-9936.2024.07.1.07. (In Russ.).

References

- [1] Z. Zeng, S. Fu, H. Zhang et al. "A survey of underwater optical wireless communications," *IEEE Commun. Surv. and Tutorials*, vol. 19, no. 1. P. 204–238, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2618841.
- [2] C. M. Gussen, P. S. R. Diniz, M. L. R. Campos et al. "A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies," *Inf. Sys.*, vol. 31, no. 1, pp. 242–255, 2016, doi: 10.14209/jcis.2016.22.
- [3] A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw, and S. Saman, "Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater," *IEEE T. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 11, pp. 2843–2849, 2004, doi: 10.1109/TAP.2004.834449.

- [4] L. Clam, *Extremely Low Frequency Transmitter Site Clam Lake*. The United State Navy. Navy fact file. Tech. Rep., Wisconsin, 2001.
URL: https://nuke.fas.org/guide/usa/c3i/fs_clam_lake_elf2003.pdf, access data 09.08.2023.
- [5] Y. Li, S. Wang, C. Jin, et al. "A Survey of Underwater Magnetic Induction Communications : Fundamental Issues, Recent Advances, and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 21, iss. 3, pp. 2466–2487, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2897610.
- [6] K. Arunkumar and C. R. Murthy, "Soft Symbol Decoding in Sweep-Spread-Carrier Underwater Acoustic Communications: A Novel Variational Bayesian Algorithm and Its Analysis," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, pp 2435–2448, 2020, doi: 10.1109/TSP.2020.2983830.
- [7] I. B. Shirokov, V. V. Golovin, E. A. Redkina et al. "Practical aspects of design of the wireless underwater optical communication system for telecommunication applications," *RENSIT : Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 31–42, 2024, doi: 10.17725/rensit.2024.16.031.
- [8] I. B. Shirokov, V. V. Golovin, E. A. Red'kina et al. "Structure and optical component base of the transceiver module for organizing an underwater optical wireless data transmission system," *Zhurnal Radioelektroniki*, no. 1, 16 p., 2024, doi: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.7>. (In Russ.).

Information about the authors

Igor B. Shirokov, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Vladislav V. Golovin, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Yelena A. Red'kina, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-8840-9550.

Igor V. Serdyuk, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Pavel P. Ovcharov, Senior Lecturer, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.396.67

Анализ вибраторной модели патч-излучателя с целью смещения измерительного расстояния в промежуточную зону

^{1,2} Громоздин В. В., ¹ Бартош А. Е., ¹ Беликов Д. Н., ^{1,2} Новикова Т. В.

¹ ФГБУ НИИР, Севастопольский филиал — Испытательный центр “Омега”
ул. Вакуленчука, 29, Севастополь, 299053, Российская Федерация

² Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
gromozdinvv@niir.ru, bartoshae@niir.ru, belikovdn@niir.ru, novikovatv@niir.ru

Получено: 23 апреля 2024 г.

Отрецензировано: 29 апреля 2024 г.

Принято к публикации: 29 апреля 2024 г.

Аннотация: Проведен анализ модели единичного патч-излучателя, представленной в виде системы из четырех элементарных электрических вибраторов с соответствующими фазами возбуждающих токов и их геометрическим расположением, расчет амплитудных распределений в области основного излучения рассматриваемой модели на основе аналитических зависимостей и сравнение их с аналогичными параметрами единичного патч-излучателя, рассчитанного в пакете FEKO. Сделан вывод о применимости данной модели для анализа возможности смещения измерительного расстояния из дальней зоны в промежуточную зону излучения.

Ключевые слова: патч-излучатель, вибратор, антенная решетка, измерительное расстояние, напряженность поля.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Громоздин В. В., Бартош А. Е., Беликов Д. Н., Новикова Т. В. Анализ вибраторной модели патч-излучателя с целью смещения измерительного расстояния в промежуточную зону // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 1. С. 106—116.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Громоздин, В. В. Анализ вибраторной модели патч-излучателя с целью смещения измерительного расстояния в промежуточную зону / В. В. Громоздин, А. Е. Бартош, Д. Н. Беликов, Т. В. Новикова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 106—116.

1. Введение

Анализ поля излучения антенных решеток современных систем мобильной связи в ближней и промежуточной зонах излучения является актуальной задачей с точки зрения вопроса сокращения измерительного расстояния, традиционно определяемого по критерию границы дальней зоны излучения, как $2D^2/\lambda$ (где D — габариты испытуемого устройства или антенны, λ — длина волны излучения). Современные программные пакеты электродинамического моделирования позволяют достаточно точно рассчитать основные технические характеристики антенных излучателей, однако для более полного понимания физического смысла и возможности измерения других параметров сигнала испытуемого устройства в промежуточной зоне удобнее использовать модели, описываемые аналитическими выражениями. Аналитические выражения поля излучения элементарного электрического вибратора приведены в [1], при этом для апертурных антенн, какими являются элементарные патч-излучатели антенных решеток, такие аналитические выражения с учетом всех составляющих электрического поля в промежуточной зоне (зоне ближнего поля излучения, зоне Френеля) отсутствуют. Целью данной работы является анализ модели единичного патч-излучателя, представленной в виде системы из четырех элементарных электрических вибраторов с соответствующими фазами возбуждающих токов и их геометрическим расположением, сравнения амплитудных распределений в области основного излучения рассматриваемой модели и аналогичных параметров единичного патч-излучателя с последующим выводом о применимости данной модели для анализа возможности смещения измерительного расстояния в промежуточную зону.

Объектом исследования является модель излучателя в виде четырех элементарных электрических вибраторов с соответствующими фазами возбуждающих токов и их геометрическим расположением.

2. Прототип рассматриваемой модели

Прототипом рассматриваемой модели является патч-излучатель с рабочей частотой 5 ГГц, выполненный на основе диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4,3$ толщиной 1,4 мм. Внешний вид патч-излучателя и его объемная диаграмма направленности (ДН), рассчитанная в пакете электродинамического моделирования *FEKO*, приведена на рис. 1-а), а срезы ДН в плоскостях XOZ (E -плоскость) и XOY (H -плоскость) для составляющих электрического поля E_θ и E_φ приведены на рис. 1-б) и 1-с) соответственно. Система координат приведена на рис. 1-д). Т. к. для дальнейших рассуждений интерес представляет характер зависимости напря-

женности поля от направления на точку наблюдения, а не сами абсолютные значения напряженности поля, то на рис. 1 и далее используются нормированные характеристики направленности. Как следует из рис. 1, составляющая поля E_φ на порядок меньше соответствующих составляющих поля E_θ , поэтому в дальнейшем составляющая E_φ не рассматривается.

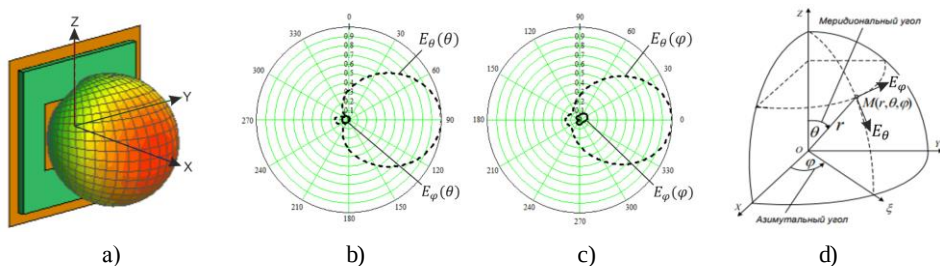


Рис. 1. Основные параметры патч-излучателя: а) внешний вид и объемная нормированная ДН по составляющей E_θ ; б) нормированная ДН в E -плоскости; в) нормированная ДН в H -плоскости; г) система координат.

Fig. 1. The main parameters of the patch emitter: a) appearance and volumetric normalized pattern according to the E_θ component; б) normalized pattern in the E -plane; в) normalized pattern in the H -plane; г) coordinate system

3. Геометрия рассматриваемой модели

Геометрия рассматриваемой модели приведена на рис. 2-а). Начальными значениями расстояний заданы $d_1 = \lambda/4$, $d_2 = 1,5 \cdot \lambda/4$, разность фаз токов возбуждения I'_1 и I''_1 (соответственно и между I'_2 и I''_2) $\Delta\phi I = \pi/4$. Расчет рассматриваемой модели в дальнейшем проводится как в пакете электродинамического моделирования *FEKO*, так и на основе аналитического выражения, приведенного в [1] для составляющей E_θ , включающей в себя все составляющие поля в зоне Френеля (ближнюю зону излучения и ближнюю реактивную зону):

$$\dot{E}_\theta = \frac{j \cdot l}{4\pi\omega_a} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3 \left(-j \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^3 + \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 + j \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) \right) \cos\theta e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r} \quad (1)$$

Т. к. для дальнейших рассуждений интерес представляет характер зависимости напряженности поля от направления на точку наблюдения, множитель, определяющий амплитудное значение $\frac{j \cdot l}{4\pi\omega_a} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3$, можно опустить, оставив только фазовые составляющие токов возбуждения. Общее выражение для модуля ДН по составляющей E_θ вибраторной модели в этом случае можно представить выражением:

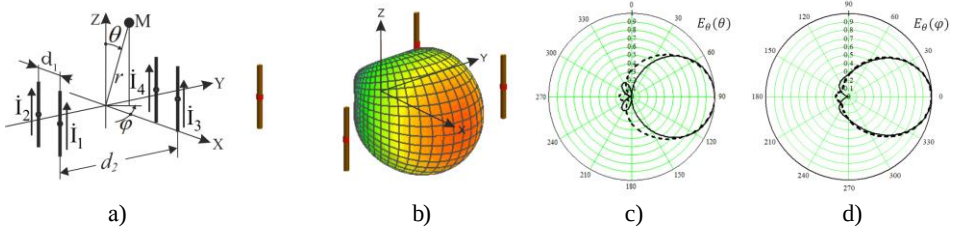


Рис. 2. Нормированные ДН по E_θ в E- и H- плоскостях для модели: а) геометрия расположения вибраторов; б) объемная нормированная ДН по составляющей E_θ ; в) нормированные ДН по E_θ в E-плоскости; д) нормированные ДН по E_θ в H-плоскости. Пунктирная линия — для патч-излучателя, сплошная линия — для рассматриваемой модели.

Fig. 2. Normalized patterns by E_θ in the E- and H-planes for the model: а) geometry of the vibrators; б) volumetric normalized pattern according to the E_θ component; в) normalized patterns by E_θ in the E-plane; д) normalized patterns by E_θ in the H-plane. The dotted line is for the patch emitter, the solid line is for the model in question

$$E_\theta^{\text{Модель}}(d_i, \theta, \varphi) \sum_{n=1}^4 \left[e^{-j\Delta\phi I_n} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3 \left(-j \left(\frac{\lambda}{4\pi r_{i,n}(\theta, \varphi)} \right)^3 + \left(\frac{\lambda}{4\pi r_{i,n}(\theta, \varphi)} \right)^2 + j \left(\frac{\lambda}{4\pi r_{i,n}(\theta, \varphi)} \right) \cos \theta e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_{i,n}(\theta, \varphi)} \right) \right] \quad (2)$$

где $r_{i,n}(\theta, \varphi)$ — i -измерительное расстояние от центра антенны до точки наблюдения $M(d_{i,n}, \theta, \varphi)$, скорректированное с учетом геометрического расположения центра соответствующего n -го элементарного электрического вибратора относительно центра координат.

На рис. 2 приведены общая ДН (а) и ДН в E- (б) и H- (в) плоскостях при $d_1 = \lambda/4$, $d_2 = 1,5 \cdot \lambda/4$ и $\Delta\phi I = \pi/4$, из которого видно, что ДН модели в пределах своего главного лепестка практически совпадает с ДН патч-излучателя и в E-плоскости XOZ и в H-плоскости XOY. Расчетные ДН рассматриваемой модели при общей длине вибраторов менее $\lambda/4$ в пакете FEKO идентичны рассчитанным в пакете Mathcad ДН по формуле (2). Рассчитанные ДН зависят от разноса вибраторов как в пространстве, так и в разности фаз токов возбуждения в модели, а также размеров подстилающего экрана патч-излучателя. При дальнейшем объединении элементов решетки преобладающую роль будет играть множитель решетки, а не параметры самого элемента. Поэтому достижение более точного совпадения диаграмм для целей дальнейшего рассуждения не представляется актуальным.

4. Анализ распределения напряженности поля в промежуточной зоне излучения

Критерии, по которым пространство делится на зоны излучения, бывают разными. Наиболее распространенным является деление пространства на части исходя из условий, что в некоторой точке пространства совпадают значения составляющих, определяемых слагаемыми, пропорциональными первой, второй или третьей степени, как это следует из (1). Кроме того, ближнее поле может подразделяться на чисто реактивное ближнее поле (в пределах одной λ) и реактивно-излучающее ближнее поле (в пределах от λ до 3λ), как это указано в [4]. Границей излучающего дальнего поля (FF) традиционно считается значение $2D^2/\lambda$, определяемое по критерию допустимого отличия набега фаз от различных частей излучающей антенны для точного значения величины и для точки наблюдения на границе дальней зоны не более $\pi/8$. Такое распределение областей поля вокруг электромагнитного источника правомерно при максимальном размере антенны D_{max} , превышающим длину волны λ [4]. Также следует обратить внимание, что границы ближнего реактивного поля и реактивно-излучающего ближнего поля не зависят от максимального размера антенны, а зависят только от λ . Начиная с нижней границы зоны излучающего ближнего поля (3λ) можно пользоваться методами геометрической электродинамики, в соответствии с которой распределение поля фокусируется в заданном направлении, приводя непосредственно к понятию диаграммы направленности, где распределение поля зависит только от направления наблюдения. Увеличение концентрации излучения, обусловленное таким геометрическим представлением, обуславливает возможность прогнозирования (оценки) оценки таких параметров, как эквивалентная изотропная излучаемая мощность ($EIRP$) и эквивалентная изотропная чувствительность (EIS) в пике луча на основе двух измерений только амплитуды поля, выполняемых в ближнем поле излучения на измерительных расстояниях вплоть до $1/8$ от границы дальней зоны [2]. При этом измерительные расстояния не должны попадать в зону реактивного и реактивно-излучающего ближнего поля.

Так, в соответствии с [2] и [3] сокращение измерительного расстояния основано на представлении зависимости нормированного к измерительному расстоянию мощности излучения в виде (рис.3-а)):

$$P(r) = -0,5b_1r^{-2} + b_2, \quad (3)$$

где b_i — коэффициенты асимптотического разложения, для оценки которых используются два измерения в одном направлении в точках r_1 и r_2 , как показано на рисунке 3-б)

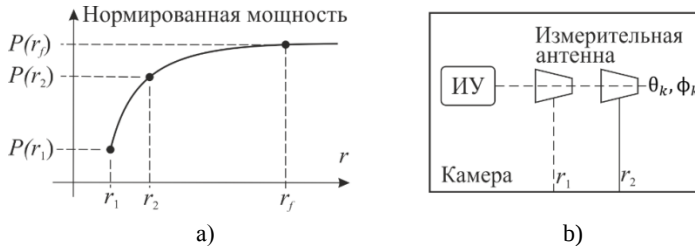


Рис. 3. а) зависимость от измерительного расстояния максимального значения нормированной к расстоянию мощности в пике луча (DUT — испытуемое устройство);
 б) общая схема измерений.

Fig. 3. а) dependence on the measuring distance of the maximum value of the power normalized to the distance at the peak of the beam (DUT – device under test);
 б) general measurement scheme

Анализ применимости рассматриваемой модели при сокращении измерительного расстояния в данной работе проводится путем сравнения зависимостей нормированной напряженности поля в пике луча для рассматриваемой модели и для патч-излучателя в пределах от границы чисто реактивного ближнего поля ($\sim \lambda$) до начала дальней зоны Фраунгофера ($2D^2/\lambda$).

В рассматриваемой модели максимальный размер $D_{max} = d_2 = 0,375\lambda$, т. е. меньше длины волны, соответственно, граница дальнего поля по критерию $2D^2/\lambda$ оказывается меньше границы реактивного ближнего поля, и в этом случае граница дальней зоны определяется из условия $\max(3\lambda; 2D^2/\lambda)$ [4]. Таким образом, для анализа эквивалентности рассматриваемой модели и патч-элемента далее приводятся результаты расчетов нормированной к расстоянию напряженности поля E_θ в пределах реактивно-излучающего ближнего поля — от $0,2FF(0,6\lambda)$ до $FF(3\lambda)$ в области направления основного излучения. Для вибраторной модели, приведенной на рис. 2, расчеты проведены на основе формулы (2) в пакете *Mathcad*, а для исходного патч-излучателя, приведенного на рис. 1, расчеты проведены в пакете электродинамического моделирования *FEKO*. Нормировка значения напряженности поля к измерительному расстоянию производится путем умножения рассчитанного значения напряженности поля на коэффициент r/FF , где r — измерительное расстояние, определяемое от центра патч-излучателя или от центра рассматриваемой модели. Рассчитанные зависимости приведены на рис. 4., где измерительное расстояние представлено в долях от границы дальней зоны FF .

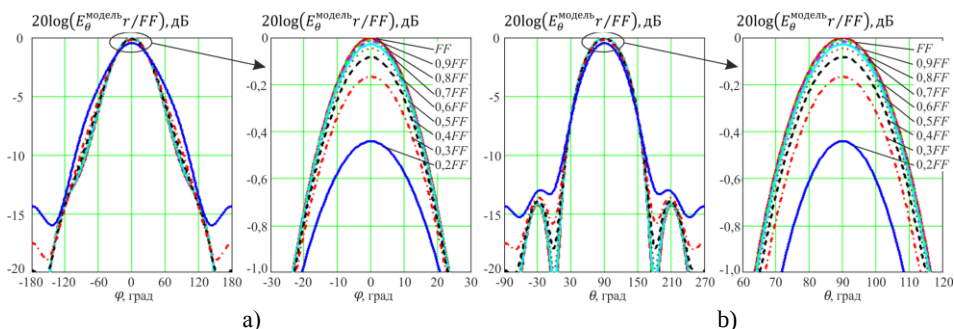


Рис. 4. Нормированные к расстоянию напряженности поля вибраторной модели в зависимости от измерительного расстояния r : а) $E_\theta(\varphi)$; б) $E_\theta(\theta)$.

Fig. 4. Field strengths of the vibrator model normalized to the distance depending on the measuring distance r : а) $E_\theta(\varphi)$; б) $E_\theta(\theta)$

Аналогичные зависимости для патч-излучателя приведены на рис. 5.

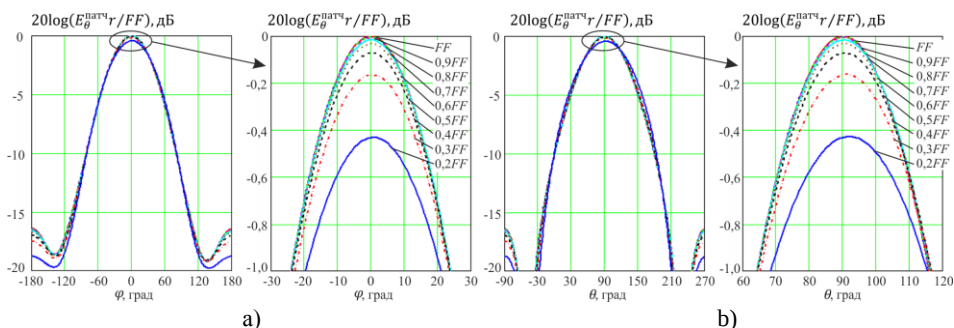


Рис. 5. Нормированные к расстоянию напряженности поля патч-излучателя в зависимости от измерительного расстояния r : а) $E_\theta(\varphi)$; б) $E_\theta(\theta)$.

Fig. 5. Field strengths of the patch emitter normalized to the distance depending on the measuring distance r : а) $E_\theta(\varphi)$; б) $E_\theta(\theta)$

Наблюдаемое на рис. 5 некоторое смещение максимума напряженности поля относительно направления $\theta = 90^\circ$ при снижении измерительного расстояния до самых малых значений объясняется смещением узла питания в патч-излучателе вдоль оси Z .

На рис. 6 приведены нормированные к расстоянию напряженности поля в максимуме излучения $\frac{E_{\theta max}}{E_{\theta max}|_{r=FF}} r / FF$ в зависимости от измерительного расстояния r для рассматриваемой модели и для патч-излучателя.

Как следует из рис. 6, нормированная напряженность поля по мере приближения к границе дальнего поля FF стабилизируется и при даль-

нейшем увеличении измерительного расстояния превращается в константу, соответствуя понятию волнодвижущей силы (произведению напряженности поля на расстояние) при отсутствии потерь на трассе распространения. Различия в приведенных зависимостях для рассматриваемой модели и для патч-излучателя пренебрежимо малы, что позволяет считать рассмотренную модель приемлемой для анализа поля в направлении максимума излучения на расстояниях, меньших границы дальней зоны.

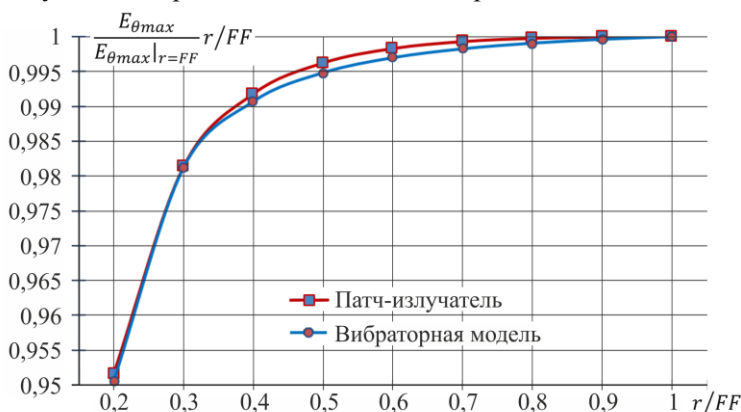


Рис. 6. Нормированные к расстоянию напряженности поля в максимуме излучения в зависимости от измерительного расстояния r .

Fig. 6. Field strengths normalized to the distance at the radiation maximum depending on the measuring distance r

5. Заключение

В работе проведен анализ модели единичного патч-излучателя, представленной в виде системы из четырех элементарных электрических вибраторов с соответствующими фазами возбуждающих токов и их геометрическим расположением, расчет амплитудных распределений в области основного излучения рассматриваемой модели на основе приведенных аналитических зависимостей и сравнение их с аналогичными параметрами единичного патч-излучателя. На основе выполненного анализа для единичного излучателя можно сделать вывод о применимости данной модели для анализа возможного смещения измерительного расстояния в промежуточную зону. С учетом того, что при объединении единичных элементов в антенную решетку границы дальней зоны увеличиваются, а на ДН решетки существенно большее влияние оказывает множитель решетки, чем ДН элемента, можно считать рассмотренную модель приемлемой для анализа поля антенной решетки в максимуме ДН на расстояниях, меньших грани-

цы дальней зоны. Для случая проведения измерений параметров абонентских устройств, в которых производителем не указано точное месторасположение антенной решетки (решеток), т. е. используется так называемая модель «черного ящика», при которой граница дальней зоны увеличивается еще больше, т. к. в качестве габарита антенны используется общий габарит измеряемого устройства, замена реальных патч-излучателей в решетке на рассмотренную модель для анализа возможного сокращения измерительного расстояния становится еще более допустимой.

Список литературы

1. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ. Ч. 1. М. : Связь, 1977. 384 с.
2. Fan W., Kyosti P., Jing Y., Wang Z. Over-the-air testing metrology of 5G radios. In : Metrology for 5G and Emerging Wireless Technologies. Chap. 10. P. 285–326.
3. 3GPP TR 38.884 V18.2.0 (2022-09); Study on enhanced test methods for FR2 NR UEs. (Release 18).
4. Рекомендация МСЭ-Т К.61 (09/2003). Серия К: Защита от помех. Руководство по измерению и численному прогнозу электромагнитных полей установок электросвязи на соответствие нормам воздействия на человека.

Информация об авторах

Громоздин Валентин Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, заместитель директора филиала Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГБУ НИИР, г. Севастополь, Российская Федерация.

Бартош Андрей Евгеньевич, директор НТЦ ОНТ Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГБУ НИИР, г. Севастополь, Российская Федерация.

Беликов Дмитрий Николаевич, ведущий инженер Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГБУ НИИР, г. Севастополь, Российская Федерация.

Новикова Татьяна Викторовна, доцент Севастопольского государственного университета, заместитель начальника ОМК Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГБУ НИИР, г. Севастополь, Российская Федерация.

Analysis of the Vibrator Model of the Patch Emitter with the Aim of Shifting the Measuring Distance to the Intermediate Zone

V. V. Gromozdin^{1,2}, A. E. Bartosh¹, D. N. Belikov¹, and T. V. Novikova^{1,2}

¹FSBI NIIR, Sevastopol branch – Test Center “Omega”

29, Vakulenchuka st., Sevastopol, Russian Federation, 299053

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, Russian Federation, 299053

gromozdinvv@niir.ru, bartoshae@niir.ru, belikovdn@niir.ru, novikovatv@niir.ru

Received: April 23, 2024

Peer-reviewed: April 29, 2024

Accepted: April 29, 2024

Abstract: An analysis of the model of a single patch emitter, presented in the form of a system of four elementary electric vibrators with the corresponding phases of exciting currents and their geometric location, was carried out, the amplitude distributions in the region of the main radiation of the model under consideration were calculated based on analytical dependencies and compared with similar parameters a single patch emitter calculated in the FEKO package. A conclusion is made about the applicability of this model for analyzing the possibility of shifting the measuring distance from the far zone to the intermediate radiation zone.

Keywords: Patch-radiant, vibrator, model, antenna array, measuring distance, field strength.

For citation (IEEE): V. V. Gromozdin, A. E. Bartosh, D. N. Belikov, and T. V. Novikova “Analysis of the Vibrator Model of the Patch Emitter with the Aim of Shifting the Measuring Distance to the Intermediate Zone,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 106–116, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.08. (In Russ.).

References

- [1] G. Z. Aizenberg, V. G. Yampolsky, and O. N. Tereshin, *VHF antennas*. Part 1. M. : Svyaz, 1977. (In Russ.).
- [2] W. Fan, P. Kyosti, Y. Jing, Z. Wang, “Over-the-air testing metrology of 5G radios,” in : *Metrology for 5G and Emerging Wireless Technologies*, chap. 10, pp. 285–326, doi: 10.1049/PBTE099E_ch10.
- [3] ITU-T Recommendation K.61 (09/2003). Series K: Anti-interference. Guidelines for measuring and numerically predicting electromagnetic fields of telecommunication installations for compliance with human exposure standards. (In Russ.).

Information about the authors

Valentin V. Gromozdin, Associate Professor, Sevastopol State University, Deputy Director of the branch of the Sevastopol Test Center “Omega” – a branch of the FSBI NIIR, Sevastopol, Russian Federation.

Andrey E. Bartosh, director of the STC DNT of the Sevastopol Test Center “Omega” – a branch of the FSBI NIIR, Sevastopol, Russian Federation.

Dmitry N. Belikov, leading engineer of the Sevastopol Test Center “Omega” – a branch of the FSBI NIIR, Sevastopol, Russian Federation.

Tatyana V. Novikova, Associate Professor, Sevastopol State University, Deputy Head of QMD of the Sevastopol Test Center “Omega” – a branch of the FSBI NIIR, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Специальные типы электронных ламп

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 29 апреля 2024 г.

Отрецензировано: 6 мая 2024 г.

Принято к публикации: 6 мая 2024 г.

Аннотация: В статье приводятся исследования трех вакуумных ламп, которые должны были составить конкуренцию аудиону Ли де Фореста, чтобы обойти его патенты. Подробно описаны исследования американского радиотехника Альберта Халла из GE по использованию магнитного управления в термоэлектронных лампах, которые привели его к изобретению динатрона — вакуумной лампы с отрицательным сопротивлением. Также обращено внимание на другую его лампу с отрицательным сопротивлением — плиодинатрон. Отмечены особенности применения динатрона и плиодинатрона. Рассмотрена также лампа негатрон, изобретенная британским радиоинженером Джоном Скотт-Таггартом. Уделено внимание ламповому триоду с управляющим плоским несплошным электродом под названием платион. Упомянут патент US1682775А Хенни Кун на конструкцию пластинчатого лампового триода.

Ключевые слова: Альберт Халл, динатрон, плиодинатрон, Джон Скотт-Таггарт, негатрон, платион, М. Седдиг, Хенни Кун, компания Huth, лаборатория доктора E. F. Huth G. M. B. H.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Специальные типы электронных ламп // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 117—143.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Специальные типы электронных ламп / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 117—143.

1. Введение

Обычные электронные лампы, в частности, триоды, характеризуются двумя основными параметрами: положительным внутренним сопротивлением и управлением электрическим полем сетки. Есть, однако, специ-

альные типы ламп, отступающие от этих положений. Одни из них характеризуются отрицательным внутренним сопротивлением (динатроны, плиодинатроны, негатроны и др.), а другие конструкцией управляющего электрода в виде плоской пластины (платионы). Хотя лампы этих типов не нашли широкого использования в практических целях, но они способствовали прогрессу в развитии техники электронных ламп.

Динатрон, электронную лампу, работающую на принципе вторичной эмиссии электронов, изобрел в 1914 году молодой научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории *GE (GERL)* в Скенектади (*Schenectady*, округ Нью-Йорк) Альберт Халл (*Albert Wallace Hull*, 19.04.1880—22.01.1966). Он начал исследования по управлению потоком электронов в вакуумных трубках с помощью магнитного поля, чтобы заменить электростатическое управление, рис. 1 [1]. Результаты этой работы должны были помочь в разработке усилителей и осциллографов без использования вакуумных триодов по патентам Ли де Фореста и Эдвина Армстронга.



Рис. 1. Альберт Халл. Ирвин Ленгмюр и Альберт Халл (1 января 1930 г.).

Fig. 1. Albert Wallace Hull. Irwin Langmuir and Albert Hull (01 January, 1930)

А. Халл работал под руководством И. Ленгмюра, и вскоре обнаружил отрицательное сопротивление динатрона. У. Кулидж, узнав об этом, особо не удивился, он посчитал это «естественным» результатом, который вытекал из исследований вторичной электронной эмиссии, которые А. Халл провел в Вустерском политехническом институте¹.

В 1918 году А. Халл разработал оригинальную вакуумную трубку с тремя электродами: термоэлектронного катода и двух анодов. Один анод перфорированный², а другой, дополнительный анод, сделан из листового

¹ Вустерский политехнический институт (англ. *Worcester Polytechnic Institute*, сокр. *WPU*) — американский частный исследовательский институт, расположенный в городе Вустер, штат Массачусетс. Основанный в 1865 году в Вустере, Вустерский политехнический институт был одним из первых инженерно-технических университетов США.

² Перфорация (англ. *perforation*, лат. *perforo* - пробиваю) - результат перфорирования, то есть предусмотренного изготовления значительного числа правильно расположенных отверстий правильной формы в листовом и ином материале.

металла (пластина). Эта вакуумная электронная лампа получила название «динатрон» (*dynatron*, *гр.* сила + (элек)трон). До прихода в Вустерский политехнический институт А. Халл изучал греческий и другие языки, что и сказалось впоследствии. Свои изобретения он называл греческими названиями: динатрон, плиотрон, тиратрон, магнетрон и т. п.

Динатрон — термоэмиссионное устройство, работающее за счет вторичной эмиссии. По своей конструкции динатрон аналогичен обычной трехэлектродной лампе, только роль электродов у него отлична. В нормальных рабочих условиях сетка и анод динатрона получают значительные положительные потенциалы, причем напряжение сетки должно быть больше анодного. Катод у динатрона служит источником первичных электронов, большая часть которых, проникая сквозь отверстия сетки, достигает анода [2, 3].

2. Принцип работы динатрона

Чтобы понять принцип работы динатрона, желательно рассмотреть эффект размещения проводника в непосредственной близости от нити накала, испускающей поток электронов. Предполагается, что эти элементы находятся в вакуумном пространстве.

Электроны, попадающие на поверхность, смешиваются с электронами проводника, и, если на проводнике поддерживается постоянный потенциал по отношению к нити, то по внешней цепи будет течь ток. Однако общее количество электронов, падающих на поверхность, не обязательно поглощается, и во многих случаях большое их количество отражается. Действие в значительной степени определяется скоростью удара, и, если при определенных условиях она достаточно высока, достигается совсем другой эффект. Быстро движущиеся электроны, исходящие от нити накала, при столкновении с поверхностью проводника выбивают другие электроны. Обнаружено, что количество вторичных электронов значительно превышает количество первичных электронов, что приводит к их отрыву от проводника.

Этим обстоятельством воспользовался А. Халл при изобретении электронной лампы, которая после стала известной как динатрон, рис. 2. Работу этого лампового устройства можно понять, обратившись к приведенным ниже рисункам [4]. На рис. 2 показана нить накала *F*, нагреваемая батареей *B1*, и анод *A* (сетка), которому от батареи *B2* придан высокий положительный потенциал по отношению к нити. Анод имеет спиральную или перфорированную форму и находится в непосредственной близости от пластины *P*, которой батарея *B3* придает более низкий положительный потенциал.

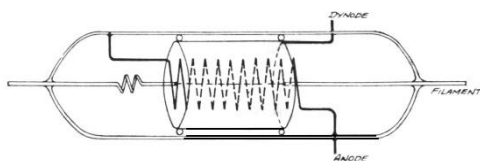
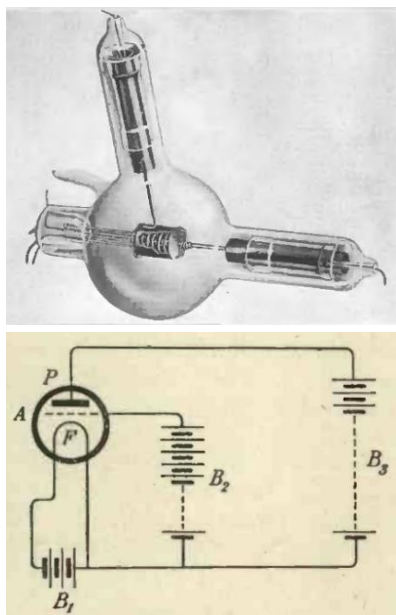


Рис. 2. Общий вид динатрона, расположение электродов в динатроне и его схема включения.

Fig. 2. General view of the dynatron, the arrangement of electrodes in the dynatron and its connection diagram

Электроны из F будут притягиваться A и вследствие очень высокого потенциала приобретут большую скорость. Благодаря воздействию анода многие электроны проходят через перфорацию и бомбардируют пластину. Скорость, с которой электроны ударяются о поверхность пластины, зависит от потенциалов анода и пластины по отношению к нити. Следует иметь в виду, что, если эта скорость достаточно велика, то вторичные электроны будут выбиваться из молекул поверхности пластины.

Таким образом, анодный ток в динатроне представляет собою разность между потоком первичных электронов и выбитыми, ушедшими на сетку вторичными. Ток же сетки равняется сумме электронов, приходящих с катода и анода. Благодаря этому, при определенных условиях увеличение потенциала анода может вызвать у него значительный рост вторичных электронов и, следовательно, уменьшение результирующего анодного тока. В этом случае динатрон приобретет свойства отрицательного сопротивления.

Однако существуют определенные критические напряжения, при которых возникает этот эффект, значения которых зависят от фактической конструкции лампы. Работу динатрона можно легко проследить, рассмотрев типичную характеристическую кривую, такую как показанная на рис. 3. а приведенные диаграммы рис. 4, 5 и 6 делают смысл кривой еще более ясным. Кривая, показанная на рис. 3, представляет собой изменение тока пластины в зависимости от напряжения пластины, при этом эмиссия

накала и анодный потенциал постоянны. Характеристическая кривая (рис. 3) построена на основании реальных данных, которые получены из практического эксперимента [4]. Напряжение на пластине отложено по оси абсцисс, а ток на пластине — по оси ординат.

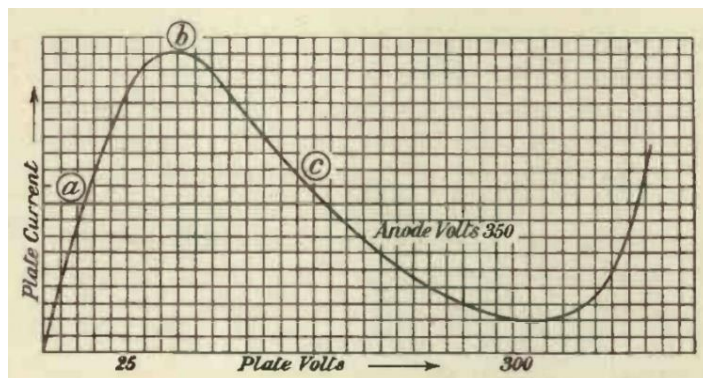


Рис. 3. Типичная характеристическая кривая, показывающая связь между напряжением на аноде и его током.

Fig. 3. Typical characteristic curve showing the relationship between plate voltage and plate current

При рассмотрении работы динатрона будем рассматривать кривую рис. 3 в сочетании с рис. 4, рис. 5 и рис. 6. Из кривой видно, что по мере увеличения напряжения пластины ток в цепи пластины увеличивается с постоянной скоростью, пока потенциал не достигнет значения около 25 В. Пока эффект практически аналогичен тому, который получается при увеличении анодного напряжения в обычной трехэлектродной лампе, при условии, конечно, что лампа не насыщена. Эта ситуация, представленная первой частью кривой, проиллюстрирована на рис. 4.

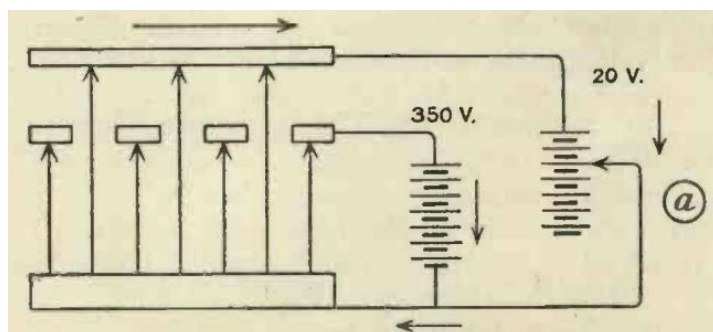


Рис. 4. Иллюстрация условия, соответствующего точке «а» кривой рис. 3.

Fig. 4. Illustration of the condition corresponding to point "a" of the curve in Fig. 3

Нить накала представлена прямоугольником F , а перфорированный анод — буквой A , постоянный потенциал которого поддерживается батареей $B2$, например, 350 вольт. Пластина показана как P , а потенциал регулируется батареей $B3$.

Электроны, исходящие из нити, будут притягиваться анодом, некоторые из них проходят по анодному контуру, а другие — через перфорации, наконец, достигая пластины и проходя по пластинчатому контуру. Направление токов указано толстыми стрелками. По мере постепенного увеличения напряжения на пластине скорость электронов, падающих на поверхность, достигает значения, при котором происходит вторичная эмиссия. Из-за высокого потенциала на аноде вторичные электроны притягиваются, и из кривой (рис. 3) видно, что конец прямолинейного ее участка «а», изгибаясь, приближается к максимальному значению тока. Это указывает на то, что ток в цепи пластины уменьшается, так как электроны с нее уходят и перемещаются к аноду. Это действие соответствует участку кривой, обозначенному «b», и дополнительно иллюстрируется рис. 5. Первичные электроны обозначены жирными линиями, а вторичные — пунктирными.

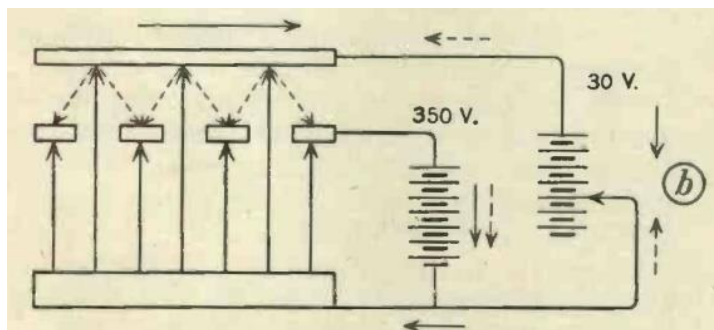


Рис. 5. Иллюстрация условия, соответствующего вершине «b» кривой рис. 3 после появления вторичной эмиссии.

Fig. 5. Illustration of the condition corresponding to the vertex “b” of the curve in Fig. 3 after the appearance of secondary emission

Полный ток в цепи пластины теперь можно рассматривать как состоящий из двух токов, его составляющих. Существует постоянный поток первичных электронов от нити к аноду, причем цепь замыкается через батарею $B3$. Вторичные электроны, выбитые из пластины, притягиваются анодом, затем ток течет по цепи через батарею $B3$, анод и батарею $B2$. Однако этот ток имеет направление, противоположное тому, которое первоначально протекало через цепь, содержащую батарею $B3$. Причина уменьшения тока в цепи теперь очевидна, на это указывает наклон кривой вниз.

По мере дальнейшего увеличения потенциала пластины вторичная эмиссия становится больше, вызывая больший ток через анодную цепь с соответствующим уменьшением в цепи пластины. Об этом свидетельствует продолжающийся наклон кривой вниз, что показано на рис. 6. Когда потенциал пластины приближается к потенциалу анода, выбитые из пластины вторичные электроны начинают возвращаться к нему, и, следовательно, ток в цепи пластины увеличивается в нормальном направлении, что характеризуется вторым изгибом и наклоном кривой вверх.

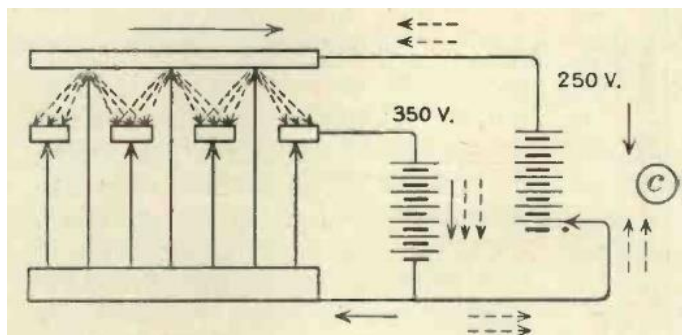


Рис. 6. Иллюстрация состояние точки «с» кривой рис. 3, когда вторичная эмиссия превышает установившийся ток в нормальном направлении.

Fig. 6. Illustration of the state of point "c" of the curve in Fig. 3, when the secondary emission exceeds the steady-state current in the normal direction

Реальная конструкция динатрона чем-то напоминает конструкцию обычной трехэлектродной лампы. Нить накала обычно имеет вид спирали из тонкой вольфрамовой проволоки. На рис. 7 представлены различные формы анода *A* и пластины *P*, которые использовались при изготовлении динатронов. Анод состоит либо из перфорированного металлического цилиндра, либо из толстой проволоочной спирали. В собранной конструкции динатрона, анод находится очень близко к пластине или «мишени» (*target*), как ее иногда называют. Если бы анод не находился в этом положении, вторичные электроны, выбитые из пластины, просто возвращались бы в нее обратно несмотря на то, что анод находится под более высоким потенциалом.

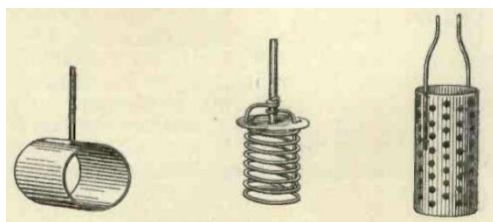


Рис. 7. Типичные формы пластинчато-спирального или перфорированного анода.
Fig. 7. Typical plate-spiral or perforated anode shapes

3. Особенности динаatronных схем

Халл подал патентную заявку на динаatron «Электронно-разрядный аппарат» (англ. *Electron discharge apparatus*) 5 июня 1916 года, а патент US1385873A получил только 26 июля 1921 года. Из-за вторичной эмиссии электронов на пластине динаatron представляет собой отрицательное сопротивление, что позволяет на такой лампе собрать усилитель беспроводных электрических сигналов (рис. 8а) или радиопередатчик для широкого диапазона частот (рис. 8б).

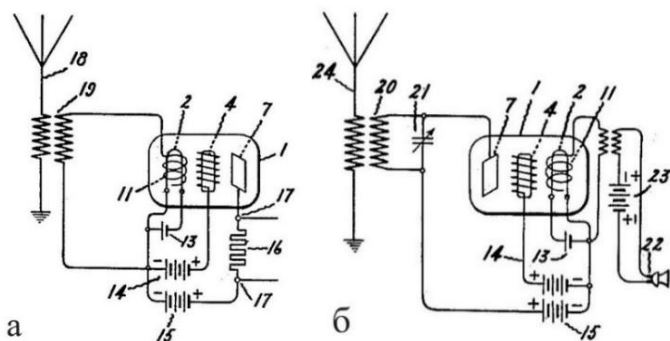


Рис. 8. Принципиальные схемы радиоприемника (а) и радиопередатчика (б) на динатроне из патента А. Халла US1385873A с приоритетом от 5 июня 1916 г.

Fig. 8. Schematic diagrams of a radio receiver (a) and a radio transmitter (b) on a dynatron from A. Hull's patent US1385873A priority dated June 5, 1916

Динаatronные схемы не имеют никаких определенных преимуществ перед обычными схемами. Хотя по своей конструкции динаatron и напоминает обычную трехэлектродную лампу, но его электроды выполняют другие функции.

Следует заметить, что динаatron может стать отрицательным сопротивлением не только для переменного, но и для постоянного тока. Другими словами, в этом случае постоянный ток в динатроне может идти не от положительного контакта к отрицательному, как в обычной цепи, а в обратном направлении. Все эти свойства динаатрона позволяют его использовать со значительным эффектом для целей детектирования и усиления, а также применять для генерирования частот от 1,8 до 15 МГц.

Поскольку амплитуда «резонансного тока» в динаatronной цепи ограничена длиной и прямолинейностью кривой отрицательного сопротивления (рис. 9), то очевидно, что при работе динаатрона на прямолинейном участке *AB* характеристической кривой ток будет асимметричным. В этом случае динаatron можно использовать в качестве детектора. Схема

детекторного приемника на динатроне показана на рис. 9, где телефон T с конденсатором C' включены непосредственно в динатронную цепь. Распределенная мощность между витками катушек телефона обеспечивает низкое сопротивление радиочастотам, что позволяет динатрону усиливать сигнал. Высокая индуктивность телефона заставит цепь колебаться на звуковой частоте, если только ее сопротивление не очень велико или к контактам не подключен конденсатор C' подходящей емкости.

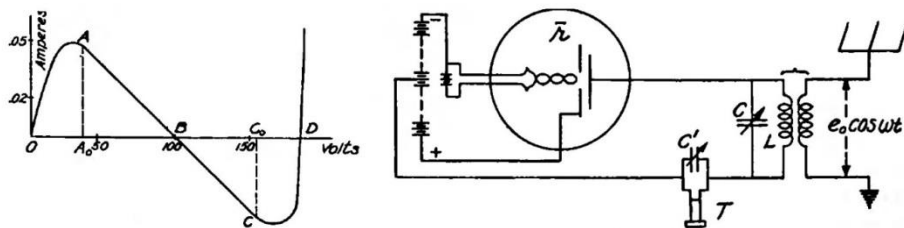


Рис. 9. Кривая, показывающая связь между напряжением пластины (анодом) и ее током в динатроне. Принципиальная схема детекторного приемника на плидинатроне.

Fig. 9. A curve showing the relationship between plate (anode) voltage and its current in a dynatron. Schematic diagram of a detector receiver based on a plyodinatron

Схема, на рис. 9, помимо высокого усиления, имеет еще два преимущества, а именно:

1. Отношение индуктивности к емкости можно подобрать так, чтобы схема колебалась с собственной частотой, очень близкой к частоте радиоволн, создавая таким образом гетеродинные биения.

2. Емкость C' и отрицательное сопротивление $\bar{r}$ могут быть подобраны таким образом, чтобы нейтрализовать сопротивление телефона для определенной звуковой частоты, определяемой произведением C' и индуктивности телефона, и, если эту частоту сделать такой же, как группа частот входящих радиоволн. При этом чувствительность сильно возрастет.

Эти предпосылки были проверены экспериментально. Приемник был собран согласно рис. 9, и прием сигналов от небольшой искровой установки сравнивался с приемом чувствительного аудиона. Для очень слабых сигналов аудион был более чувствительным, что указывало на небольшую асимметрию динатронных колебаний. Однако для средних сигналов динатронный отклик был во много раз сильнее, и его интенсивность можно было увеличить почти в несколько раз, изменяя емкость C .

В конструкции динатрона А. Халла для большего удобства управления электронным потоком имеется вторая сетка, расположенная вблизи катода. Потенциал этой сетки определяет число первичных электронов, попадающих на анод, и таким образом производится регулирование коли-

чества выбиваемых из него вторичных электронов. Подобную вторую сетку, для тех же целей, применил впервые И. Лангмюр в плиотроне в 1913 г. (патент US1558437A).

При цилиндрической форме электродов динатрона для управления электронным потоком иногда применяют добавочное магнитное поле, направляя его вдоль оси электродов. Действие этого поля то же, что и у магнетронов.

Динактронную схему можно собрать и на традиционном триоде (с обычной слабой сеткой), если ограничиться малыми мощностями, то есть не перегружать сетку.

Что касается динактронного генератора (рис. 2 и рис. 8б), то его недостатком является малая экономичность, обусловленная потерями мощности на большие сеточные токи, а также вызванное этими токами слишком большое разогревание сетки. Вместе с тем динактронный генератор не обладает какими-либо существенными преимуществами перед обычными схемами генераторов на лампах. Поэтому практическое значение динактронного генератора невелико и его применение целесообразно лишь в отдельных специальных случаях.

4. Плиодинактрон

Если в динактроне поставить управляющую сетку между катодом и перфорированным анодом, то такое электронное ламповое устройство с двумя сетками называется плиодинактроном (*pliodynatron*). Созданный Халлом плиодинактрон, по-существу, являлся комбинацией плиотрона и динактрона. Это устройство имеет настоящую сетку, а также анодный и пластинчатый электроды и представляет собой четырехэлектродное устройство. Плиодинактрон, как и динактрон, наиболее эффективен в генераторных схемах. В этой лампе сетка, как обычно, является электростатическим элементом управления и при правильном выборе условий обеспечивает стабильное управление колебательной энергией в цепи LC . Изменение потенциала сетки (определяемое батареей B'' или иным образом) приводит к изменению выходной мощности лампы. В этой лампе управление анодным током можно осуществлять не только с помощью управляющей сетки, но и с помощью магнитного поля, направленного параллельно оси лампы.

Схема включения плиодинактрона в качестве генератора электрических колебаний показана на рис. 10 [5].

Метод управления выходной мощностью плиодинактрона заключается в изменении потенциала сетки. На первый взгляд может показаться, что



Рис. 10. Устройство плиодинатрона согласно патенту А. Халла US1385873A приоритетом от 5 июня 1916 г. Условно-графическое обозначение плиодинатрона на схемах. Схема включения плиодинатрона в качестве генератора электрических колебаний.

Fig. 10. The design of the pliodynatron according to A. Hull's patent US1385873A priority dated June 5, 1916. Graphic designation of the pliodynatron in the diagrams.

Circuit diagram for connecting a pliodynatron as an electrical oscillation generator

это либо остановит все колебания (если бы сетка была достаточно отрицательной), либо позволит им сохранять полную интенсивность. Действительно, из-за кривизны динактронной характеристики при определенных условиях можно получить кривую управления плиодинатроном (током сеточной потенциальной пластины), подобную той, что показана на рис. 11 [6]. Эта кривая имеет значительную прямолинейность на части линии и, следовательно, между точками *A* и *B* на ней, при этом становится возможным управлять выходной мощностью лампы путем изменения потенциала сетки. Принципиальная схема плиодинактронного радиотелефонного передатчика *General Electric Company-Hull* показана на рис. 11. Как можно видеть, цепь L_1C_1 подключается обычным для динактронов способом между пластиной и точкой отвода батареи *D*.

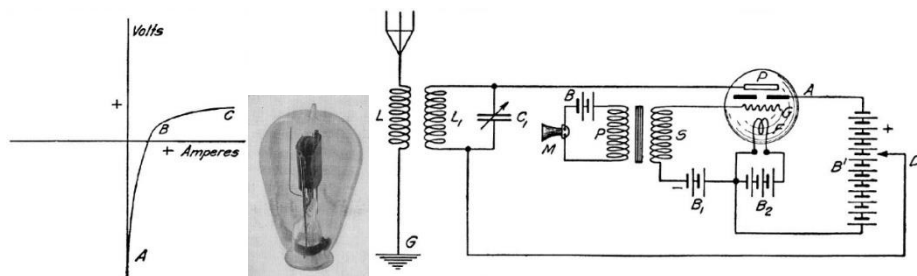


Рис. 11. Анодно-сеточная характеристика плиодинатрона. Лабораторный образец плиодинатрона. Плиодинактронный радиотелефонный передатчик *General Electric Company-Hull*.

Fig. 11. Grid potential-plate current characteristic of a pliodynatron. Laboratory model of pliodynatron. *General Electric Company-Hull* pliodynatron radiophone transmitter

Микрофон M через трансформатор соединен с сеткой плиодинатрона. В соответствии с изменениями речевого сигнала изменяется потенциал сетки. Модулированный выходной сигнал поступает в антенную цепь через индуктивную связь между катушками L_1 и L_2 . На практике радиотелефонная связь на расстоянии 16 миль (26 км) легко осуществляется с помощью одного плиодинатрона, но дальность передачи, несомненно, можно было значительно увеличить, но в то время не было предпринято никаких попыток получить максимально возможную мощность или дальность действия.

В 1958 году *IRE* наградил Почетной медалью Альберта У. Халла за выдающиеся научные достижения, а также новаторские изобретения и разработки в области электронных ламп.

5. Применение динаatronной технологии

Характеристическая кривая связи между напряжением на аноде и его током у ламповых триодов типа *R*, *V24*, *Ora*, *QX* и подобных ламп при их использовании в качестве динаatronов с низкими анодными напряжениями от 50 В до 150 В в большей или меньшей степени отражает наличие эффекта отрицательного сопротивления. Благодаря этому эффекту любую из этих ламп можно заставить генерировать электрические колебания, подключив подходящую катушку к цепи анода. Выпрямление также можно получить, отрегулировав напряжение на сетке по отношению к напряжению анода так, чтобы использовался один из двух изгибов кривой тока анода (см. рис. 13.3).

Схема, показанная на рис. 12, на практике является вполне подходящей для приема длинноволновых станций. Похоже, что она столь же эффективна, как и автодинная регенеративная схема, и даже более эффективна, чем однокатушечная автодинная схема де Фореста «ультраудион». В качестве анода используется сетка триода, а в качестве сетки или вспомогательного анода используется реальный анод.

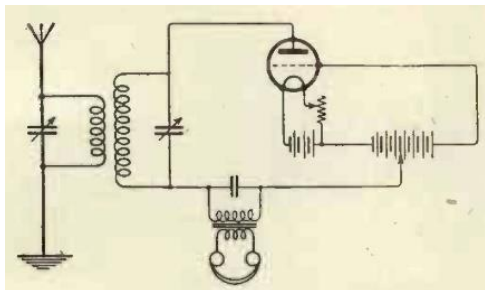


Рис. 12. Принципиальная схема приемника прямого усиления на ламповом триоде, включенном по схеме динаatronа.

Fig. 12. Schematic diagram of a direct amplification receiver using a tube triode connected according to a dynatron circuit

Основное применение динатрона, однако, представляет собой простой независимый генератор колебаний. Благодаря эффекту отрицательного сопротивления его можно также использовать в качестве усилителя тока или напряжения или для нейтрализации положительного сопротивления. По сути, он имеет бесчисленное множество применений.

Упрощенный вариант сверхрегенеративной схемы Армстронга должен обладать способностью гашения генерации с частотой от 8000 до 15000 Гц. При использовании динатрона сверхрегенеративная схема получается значительно проще обычного регенеративного генератора, использующего электромагнитную или электростатическую связь между сеткой и анодными катушками. В качестве динатрона подойдет работающая приемная или небольшая генераторная лампа. Эксперименты подтвердили эту гипотезу, и на рис. 13 показан один из многих возможных вариантов использования принципа динатрона.

Колебательные потенциалы, создаваемые действием динатрона D на индуктивности L , двусторонней катушки № 1500, изменяют анодное напряжение детекторной лампы V с частотой, регулируемой с помощью конденсатора C так, чтобы она была чуть выше точки слышимости для приема телефонной связи, тогда как для искровых сигналов частота может быть значительно ниже. Батарея B_1 имеет отводы с интервалом 3 В, поэтому можно легко подобрать правильное напряжение для анода динатрона. Напряжение B_2 не обязательно должно быть изменяющимся.

Наиболее подходящей для использования в качестве динатрона с низкими анодными напряжениями является триод-детектор $M-OV QX$ (рис. 13) благодаря расположению электродов. Эта лампа представляет собой также хороший объект для экспериментов.

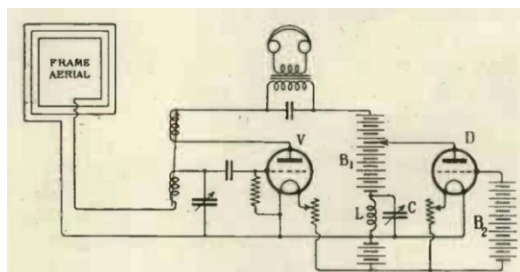


Рис. 13. Применение динатронной схемы в сверхрегенеративном приемнике.
Общий вид лампового триод-детектора $M-OV QX$ (1920 г.)

Fig. 13. Application of a dynatron circuit in a super-regenerative receiver.
General view of the tube triode-detector $M-OV QX$ (1920)

Преимущества динаatronной схемы, как правило, проявляются и в случае, когда две обычные трехэлектродные лампы включаются параллельно вместо одного динаatronа, при этом часть кривой анодного тока с отрицательным сопротивлением значительно становится круче.

6. Негатрон

Эффект отрицательного сопротивления стал известен в 1900 году, когда английский физик Вильям Дуддель (*William du Bois Duddell*) впервые реально показал, что электрическая дуга способна вызывать незатухающие электромагнитные колебания. С этой даты дуга для многих целей становится основным средством общения по беспроводной связи на большие расстояния. Электрическая дуга и динаatron, как было показано, обладают фактическими статическими отрицательными характеристиками сопротивления, позволяющими создавать высокочастотные колебания. Нейтрализация с помощью отрицательного сопротивления обычного сопротивления цепи позволяет значительно усилить сигналы всех видов, что дает возможность сократить сопротивление длинных участков телеграфного кабеля. Однако главным использованием отрицательной резистивной электронной лампы является генерирование непрерывных колебаний для использования в беспроводной передаче или приеме методом биений.

В сентябре 1919 года британский радиоинженер Джон Скотт-Таггарт (*John Scott-Taggart*, 1897—1979) из *Radio Communication Co.* изобрел триод с дополнительным анодом, способный генерировать колебания благодаря «падающей характеристической кривой». При этом он хотел обойти существующие патенты Ли де Фореста (*Lee de Forest*), Александра Мейснера (нем. *Alexander Meißner*), Эдвина Армстронга (*Edwin Armstrong*) и Хута-Кюна³ (нем. *Huth-Kühn*). Ожидая выдачи патента, он отложил публикацию подробностей своего изобретения до 1921 года. Четырехэлектродная электронная лампа Скотт-Таггарта получила название «Негатрон» (*Negatron*), рис. 14 [7].

Эта негатронная лампа в отличие от обычного лампового триода содержала два плоских анода, между которыми располагается нить накала и сетка. Анод *A1* называется «главным», а анод *A2* — «вспомогательным» (называют также «*diversion plate*» — отводной или отклоняющий анод),

³ Разработка Хута-Кюна представляет собой схему генератора, в которой отсутствует заметная обратная связь, однако, несмотря на это, он очень надежно генерирует электрические колебания. Схема была запатентована Людвигом Кюном (нем. *von Ludwig Kühn*), который работал в фирме доктора Э. Ф. Хута (нем. *Erich F. Huth*) в Берлине в 1917 году. Немецкий патент DE310152C «Схема для генерации колебаний с помощью электронных ламп» (нем. *Schaltungsweise zur Schwingungserzeugung mit Vakuumröhren*) был зарегистрирован 28 сентября 1917 г.

причем последний обычно больших размеров, чем $A1$. Оба анода питаются от общей батареи, создающей в обеих цепях примерно одинаковые токи, равные в сумме току насыщения. Другим словами, после прогрева нити накала электроны, испускаемые нитью, распределяются равномерно между двумя анодами. На рис. 14 показано устройство негatrona.

В схему негatron включается обычно таким образом, чтобы изменение потенциала у главного анода приводило к изменению потенциала того же знака и у сетки. Это вызывает в цепи вспомогательного анода приращение тока того же знака, благодаря чему ток в цепи главного анода изменяется с обратным знаком (так как сумма обоих токов постоянна и равна току насыщения). Следовательно, цепь главного анода в этих условиях имеет свойства отрицательного сопротивления и может быть использована для детекторных, усилительных и генераторных целей [8].

На негatron Дж. Скотт-Таггарт получил Британский патент [9], а всего за свою деятельность он получил 51 патент на изобретения.

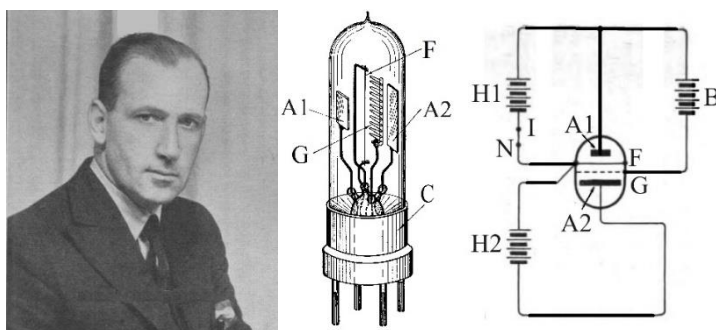


Рис. 14. Джон Скотт-Таггарт. Общий вид и устройство негatrona: $A1$ — главный анод, F — нить накала, G — сетка, $A2$ — вспомогательный анод, C — цоколь.
Схема включения негatrona.

Fig. 14. John Scott-Taggart. General view and structure of the negatron: $A1$ — main anode, F — filament, G — grid, $A2$ — auxiliary anode, C — base. Negatron connection diagram

В экспериментальном образце аноды были вырезаны из никелевого тонкого листа. Анод $A1$ представлял собой пластинку размером $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 0,2 \text{ мм}$, которая располагалась в 9 мм от нити накала F . Анод $A2$ имел следующие размеры: $22 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 0,2 \text{ мм}$ и находился в 2 мм от нити накала. Нить накала из вольфрамовой проволоки диаметром $0,6 \text{ мм}$, ее длина в зигзагообразном виде 25 мм . В эксперименте [10] с такой лампой была получена падающая характеристика тока I_a на главном аноде $A1$ относительно напряжения V_g на сетке G (рис. 15) благодаря тому, что при подходящем подборе геометрических размеров и взаимного расположения сетки и обоих анодов ток I_{a2} увеличивается за счет тока I_{a1} .

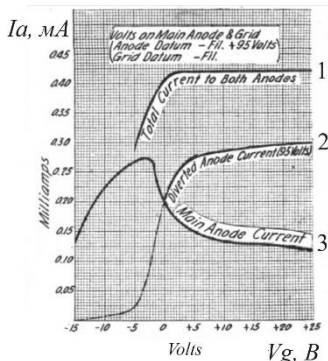
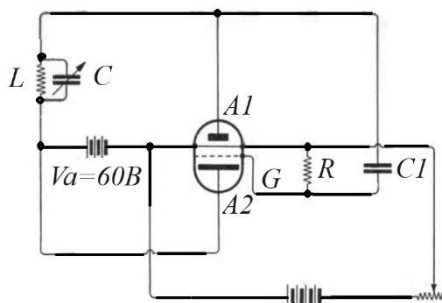


Рис. 15. Принципиальная схема генератора на негатроне. Характеристические кривые негatronной лампы: 1 — общий ток двух анодов — $I_{a1} + I_{a2}$, 2 — отклоняющий анодный ток (95 В) — I_{a2} , 3 — основной анодный ток I_a .

Fig. 15. Schematic diagram of a negatron generator. Characteristic curves of a negatron valve: 1 – Total Current to Both Anodes $I_{a1} + I_{a2}$, 2 – Diverted Anode Current (95 Volts) I_{a2} , 3 – Main Anode Current I_a

У негatronа падающая характеристика ab (рис. 15. кривая 3) обуславливает наличие *отрицательного сопротивления* $\frac{\partial I_{a1}}{\partial V_g} < 0$ (отсюда название «негатрон»), которое, как и в вольтовой дуге или динатроне, способствует возникновению колебаний в колебательном контуре LC (рис. 15). В этой схеме сетке G сообщается необходимое (мгновенное) напряжение от колебательного контура через конденсатор $C1$, причем повышение напряжения на главном аноде $A1$ увеличивает V_g и тем самым уменьшает I_{a1} (благодаря увеличению I_{a2}). Утечка через большое сопротивление R обеспечивает, как обычно, поддержание нужного среднего напряжения на сетке, фиксируя тем самым выгодную рабочую точку на характеристике. R и $C1$ могут быть заменены особой батареей, включаемой вместо $C1$ отрицательным полюсом к аноду $A1$ и положительным к сетке G . Рабочая точка и ток накала выбираются так, чтобы полный ток испускания $I_{a1} + I_{a2}$ равнялся току насыщения и распределялся между $A1$ и $A2$ примерно поровну.

В негатроне присутствуют два эффекта, которые регулируют анодные токи. Первый эффект, увеличение потенциала анода, имеет тенденцию к увеличению анодного тока, а второй — эффект утечки, имеет тенденцию к уменьшению анодного тока. Эффект утечки преобладает над первым эффектом, в результате этого уменьшается основной анодный ток и увеличивается электрический потенциал главного анода. Уменьшение потенциала главного анода делает сетку более отрицательной, и уменьшает ток вспо-

могательного анода A_2 , и анодный ток, следовательно, увеличивается. Таким образом, негатрон действует как отрицательное сопротивление. Негатрон генерирует только в том случае, когда величина тока накаливания находится в определенном диапазоне его значений. Отрицательный эффект сопротивления полностью исчезает, когда ток накала выше 0,575 А. Аналогично он исчезает по другой причине, когда ток накала очень мал.

7. Особенности использования негатрона

На практике негатрон чрезвычайно прост в использовании, причем основная регулировка заключается в регулировке свечения нити, которое определяет насыщенность лампы, благодаря чему достигается эффект отрицательного сопротивления. Негатрон не нашел широкого технического использования из-за узкого диапазона генерируемых частот (15—500 кГц).

Скотт-Таггарт также предложил использовать негатрон для уменьшения потерь в настроенной схеме приемника. Если режим работы негатрона в роли генератора подобрать таким, что компенсация активных потерь в колебательном контуре будет неполной, то самовозбуждение колебаний не возникнет. В этом случае добротность Q контура окажется весьма большой, и чувствительность приемника значительно увеличится. Негатрон при таком использовании представляет собой умножитель добротности. Изобретатель Скотт-Таггарт понимал, что точно такой же эффект можно получить с помощью обычной регенеративной схемы, но посчитал, что лучше использовать негатрон, поскольку он не вызывает нарушений настройки, которые являются следствием переменной индуктивной связи в регенеративной системе.

Интересно рассмотреть работу негатрона в более общем контексте [11]. Как уже говорилось, изменение потенциала сетки вызывает равные, но противоположные изменения двух анодных токов. Если в анодные цепи включены равные сопротивления нагрузки, то потенциал одного анода увеличится, а другого уменьшится на такую же величину, что напоминает своеобразные качели. В этом случае негатрон можно рассматривать как предшественника «качающегося» фазоделителя, который использовался в последующие годы для управления двухтактными выходными каскадами в аудиоусилителях.

Еще один интересный момент заключается в том, что если в схеме рис. 15 колебательный контур заменить резистором, то получим устройство с положительной обратной связью (рис. 16а). Это устройство может работать как релаксационный генератор, производящий сигналы с острыми пиками на частоте, определяемой постоянной времени конденсатора связи и резистором утечки сетки.

Существенным требованием к работе негатрона является ограничение катодной эмиссии с целью насыщения всей лампы. Катодный ток постоянен, а источник постоянного тока имеет очень высокое сопротивление. Схема устройства негатрона в этом случае показана на рис. 16б, где функция постоянного тока представлена как внутреннее высокое сопротивление в катодной цепи. Необходимо понимать, что это «динамическое» сопротивление с одной стороны противодействует изменению тока, а с другой — поддерживает устойчивый ток эмиссии. Такое устройство при некоторых предпосылках можно рассматривать как нечто похожее на фазоинвертор с катодной связью, примером которого является так называемый дифференциальный усилитель.

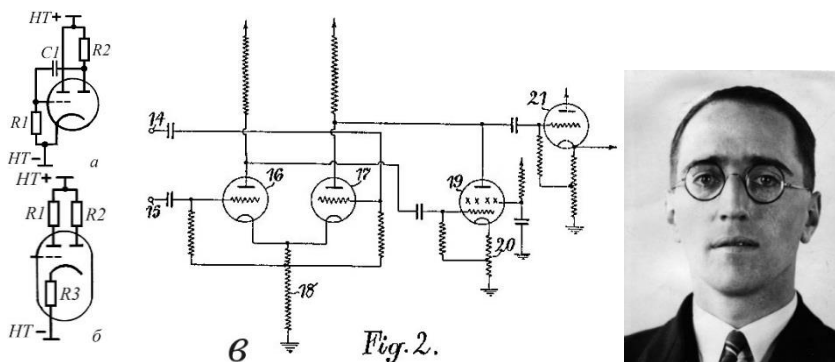


Рис. 16. Принципиальные схемы: а — релаксационного генератора, б — дифференциально-го усилителя, в — дифференциального усилителя (триоды 16 и 17) из патента А. Блюмляйна GB482740А с приоритетом от 4 июля 1936 г. Фото Алана Блюмляйна.

Fig. 16. Schematic diagrams: а – relaxation oscillator, б – differential amplifier, в – differential amplifier (triodes 16 and 17) from A. Blumlein's patent GB482740A with priority dated July 4, 1936. Photo by Alan Blumlein

Во время работы Скотта-Таггарта в 1919 году не существовало осознанной потребности в разделении фазы или связанных с ней приложениях негатрона, и поэтому он указал только на одну его особенность — отрицательное сопротивление. Реальная схема фазоинвертора с катодной связью на двух триодах (рис. 16в), а не диод-триод (негатрон), была изобретена и запатентована Аланом Блюмляйном⁴ 17 лет спустя, в 1936 году [12]. К концу 1930-х годов схема дифференциального усилительного каскада была хорошо известна и описана различными авторами. С тех пор эта схема стала важным компонентом широкополосных балансных усилите-

⁴ Блюмляйн Алан (Alan Dower Blumlein, 29.06.1903—07.06.1942) — сотрудник *Electric & Musical Industries, Limited, Hayes, Middlesex, England, a British company*.

лей, операционных усилителей и т. п., вплоть до эры транзисторов и интегральных схем. Если бы в 1919 году возникла необходимость в такой технологии, то Скотт-Таггарт вполне мог бы заняться дальнейшим развитием и применением своей концепции негатрона.

8. Платион

Американский радиотехник Ли де Форест в ходе своих экспериментов с вакуумным диодом, среди прочего, прикрепил к стеклянному баллону лампы дополнительные электроды и разработал два особенно эффективных устройства, которые он запатентовал в 1906 г. (US841387A) и 1907 г. (US879532A) [13]. Базовую схему диода с нагретым катодом и холодным анодом де Форест дополнил плоским металлическим электродом, расположив его перед нитью накала и анодом. Другой вариант лампового триода с «сеткой» в пространстве между нитью и анодом был доведен до высокой степени совершенства в последующие десятилетия и хорошо известен нам как трехэлектродная электронная лампа под названием «аудион».

Когда Ли де Форест больше не мог позволить себе оплату иностранных патентных пошлин, ему пришлось отказаться и от патента, зарегистрированного в Германии (DE217073 с приоритетом от 23 января 1908 г.). На основании патента на лампу Либена компания *Telefunken* зарегистрировала ряд других патентов на электронную лампу с сеткой, так что ни одна другая компания в Германии фактически не могла производить лампы без нарушения патентов.

Поэтому неудивительно, что ламповые компании искали пути выхода из этой ситуации и о первой конструкции де Фореста снова вспомнили. Такая трубка в основном имеет структуру, показанную на рис. 17а. С обеих сторон нагревательной нити имеются пластины из листового металла, одна из которых служит анодом, а другая — «управляющей пластиной». Электрическое поле пластины управления распространяется в пространство между катодом (нитью накала) и анодом. Изменения напряжения на управляющей пластине вызывают колебания анодного тока, хотя это кажется необычным тем из нас, кто знаком только с сеточным триодом. Этот эффект также использовался в лампах *Arcotron* с внешним управляющим электродом [14].

В 1920 г. сообщалось об экспериментах проф. М. Седдига (*M. Seddig*) с ламповыми триодами с пластинчатым управляющим электродом в Физическом институте Вюрцбургского университета (нем. *Physikalischen Institut der Universität Würzburg*) [15]. Последний из ламповых триодов имел «лилипутский формат» (рис. 16б) с горизонтально расположенными

электродами. Результаты были не очень обнадеживающими, и дальнейшие разработки прекратились, так как электронная лампа не отвечала требованиям промышленного производства.

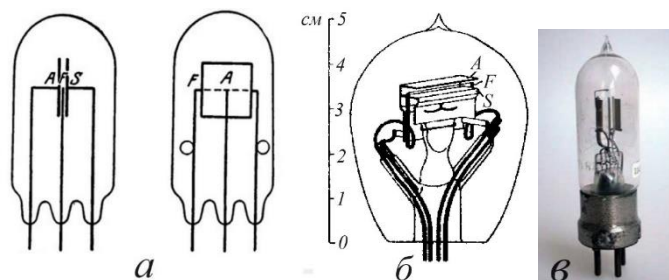


Рис. 17. Конструкции пластинчатых ламповых триодов: а — устройство триода с управляющей пластиной S (А — анод, F — нить накала), б — лампа «Лилипут» проф. Седдига (Вюрцбург), 1920 г. [15], в — полярный негатрон Скотта-Таггарта.

Fig. 17. Designs of plate lamp triodes: а – triode device with control plate S (A – anode, F – filament), б – “Lilliput” lamp prof. Seddiga (Würzburg), 1920 [15], в – Scott-Taggart polar negatron

Попытки сконструировать ламповый триод с пластинчатым управляющим электродом были предприняты Скоттом-Таггартом. В его конструкции лампы, которую он назвал «полярный негатрон» (*Polar-Negatron*), между нитью накала и анодом нет управляющей сетки, рис. 17в. В этой лампе вертикально расположенная нить накала находится в изогнутой канавке пластины, которая расположена позади нити, если смотреть со стороны анода. Подобная конструкция, только с горизонтально расположенной нитью накала, позже была реализована Хутом в триоде типа PLAV9 под торговой маркой «Plation».

В 1924 году компания *Huth* удивила всех, анонсировав пластинчатую электронную лампу в своем собственном журнале «*Die Antenne*»: «Теперь стало возможным, в частности, благодаря работе физика мисс Хенни Кун (*Frl. Henny Cohn*), создать пластинчатую лампу *Plation*, которая работает без сетки и чьи свойства эквивалентны современным трехэлектродным лампам с сетками» [16]. Научные исследования Кун были проведены в *Laboratorium der Dr. E. F. Huth G. M. B. H.*

Хенни Кун описала свои разработки в «Журнале технической физики» (нем. *Zeitschrift für technische Physik*) [17]. В результате экспериментов она установила, что наилучший эффект управления достигается тогда, когда нагревательная нить расположена в выемке в плоскости управляющей пластины. Для этого она сделала «выемку» (паз) на электроде и назвала его «пазовая управляющая пластина» (нем. *Dellen-Steuerplatte*) (рис. 18). На

конструкцию пластинчатого лампового триода Кун получила американский патент US1682775A 18 июля 1924 [18]. В результате исследований было отмечено, что, в отличие от сеточных ламп, заметный ток управляющей пластины возникает только при положительных напряжениях выше +3 В.

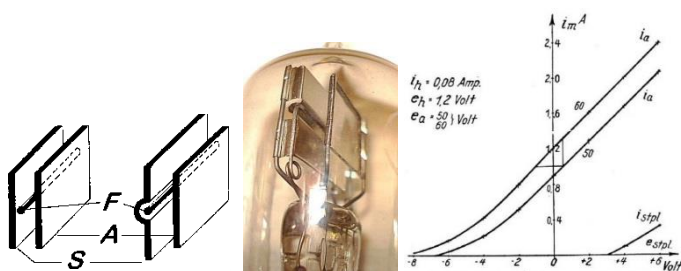


Рис. 18. Слева — ранее и принятое положение нагревательной нити F между управляющей пластиной S и анодом A . Посредине — расположение управляющей пластины (с пазом) и анода в реальной конструкции триода, предложенное Х. Кун [17].

Справа — характеристические кривые опытного образца №10745 Plation (крутизна $S = 0,2 \text{ мА/В}$; проницаемость $D = 15 \%$; коэффициент усиления $\mu = 1,35$; внутреннее сопротивление $R_i \sim 30 \text{ кОм}$; рабочий ток начинается с +3 вольт).

Fig. 18. On the left is the previously accepted position of the heating filament F between the control plate S and the anode A . In the middle is the location of the control plate (with a groove) and the anode in a real triode design, proposed by von H. Cohn [17]. Right — Characteristic curves of prototype No. 10745 Plation (Slope $S = 0.2 \text{ mA/V}$; Permeability $D = 15 \%$; Gain $\mu = 1.35$; internal resistance $R_i \sim 30 \text{ kOhm}$; operating current starts at +3 volts)

Управляющий электрод в разработанной конструкции триода Хенни Кун располагался на другой стороне нити, противоположной аноду. Расстояние между двумя пластинами составляло $\sim 2 \text{ мм}$. Если бы нить была расположена симметрично между двумя пластинами, проницаемость лампы этого типа была бы $D = 1$, поскольку емкость анод — катод тогда была бы равна емкости управляющей пластины — катод ($D = C_a/C_g$). Для получения хорошего уровня усиления управляющую пластину установили ближе к нити накала и добились $D = 50 \%$.

Поскольку управляющую пластину удалось разместить очень близко к катоду, крутизна лампы получилась очень хорошая: $S = \sim 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{V}}$. При обычной односеточной лампе $S = \sim 1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{V}}$. Отсюда по известной формуле внутреннее сопротивление пластинчатого триода получилось $R_i = \frac{1}{D \cdot S} = \sim 10000 \text{ Ом}$. При таком небольшом внутреннем сопротивлении, можно использовать низкое анодное напряжение и получить требуемый ток через лампу. Фактически лампы с двойной пластиной уже работают при анодном напряжении 10—20 В. Для нагревания нити накала требуется

электрический ток 75—85 мА при напряжении 1—2 В, то есть мощность нагрева составляет 75—110 мВт. Это свидетельствует о том, что ламповый пластинчатый триод относится к группе экономичных ламп и может эксплуатироваться с сухими гальваническими элементами.

9. Использование пластинчатого лампового триода

Лампы типа *Huth PLAV 9* очень хорошо подходят для усилителя низкой частоты (при малом R_i сопротивление трансформатора может быть небольшим, как и при малом анодном напряжении). Некоторые характеристики опытного образца пластинчатого лампового триода *Huth PLAV 9* приведены в табл. 13.1 [19]. Реальный срок службы триода составляет 2000 часов, при бережном обращении до 5000 часов.

Табл. 1. Характеристики опытного образца пластинчатого лампового триода *Huth PLAV 9*
Table 1. Characteristics of a prototype of the *Huth PLAV 9* plate tube triode

Анодное напряжение	Электронная эмиссия при мощности нагрева 1 Вт, мА/Вт	Крутизна	Внутреннее сопротивление	Проницаемость	Добротность
Anoden-spanne, V	Elektro-nenemission für 1W Heizleist. mA/W	Steilheit, A/V	Innerer Widerstand, Ohm	Durchgriff, %	Güte, 1/Ohm
12	2,4	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	80	$2,1 \cdot 10^{-4}$

Из принципа работы пластинчатого триода вытекает интересный аспект, на который в 1923 г. указывал Г. Баркгаузен [20]: высоковакуумный двухполупериодный выпрямитель не может работать в схеме, показанной на рис. 19. Это связано с тем, что когда на один анод подается положительное напряжение, то есть он поляризуется в прямом направлении, то на другой анод поступает отрицательное напряжение того же уровня, что и на первый анод, что полностью препятствует протеканию тока.

Вот почему двухполупериодные выпрямители с высоковакуумными лампами всегда работают с двумя отдельными системами. Такое расположение электродов можно использовать только с ионными трубками (например, ртутными выпрямителями).

Компания *Huth* изготовила небольшие серии ламп конструкции Хенни Кун, которые использовались как в приемниках, так и в передатчиках. В рекламе 1924 года были анонсированы два типа ламповых пластинчатых триода с двумя разными оксидными нагревательными нитями: *PLAV 9* с синим колпачком и *PLAV 12* с желтым колпачком, табл. 13.2 [19].

Табл. 2. Характеристики пластинчатых ламповых триодов *Huth PLAV 9* и *Huth PLAV 12*
Table 2. Characteristics of plate tube triodes *Huth PLAV 9* and *Huth PLAV 12*

Тип триода	Цвет маркировки	Напряжение нагрева	Ток нагрева	Анодное напряжение	Крутизна	Проницаемость	Внутреннее сопротивление
Typ	Kennfarbe	Heizspg	Heizstrom	Anodenspannung	Steilheit	Durchgriff	Innenwiderstand
PLAV 9	Blaue Kappe	1,0–1,3 V	0,075–0,085 A	50–60 V	0,2 mA/V	15 %	30 kOhm
PLAV 12	Gelbe Kappe	0,9–1,0 V	0,18–0,20 A	50–60 V	0,2 mA/V	15 %	30 kOhm

Лампы *Plation* предлагались с разными цоколями: американским, *Huth*, *Philips* и немецким *Telefunken*. Один сохранившийся экземпляр из опытного производства лампы Платион (нем. *Das Plation*) приведен на рис. 19.

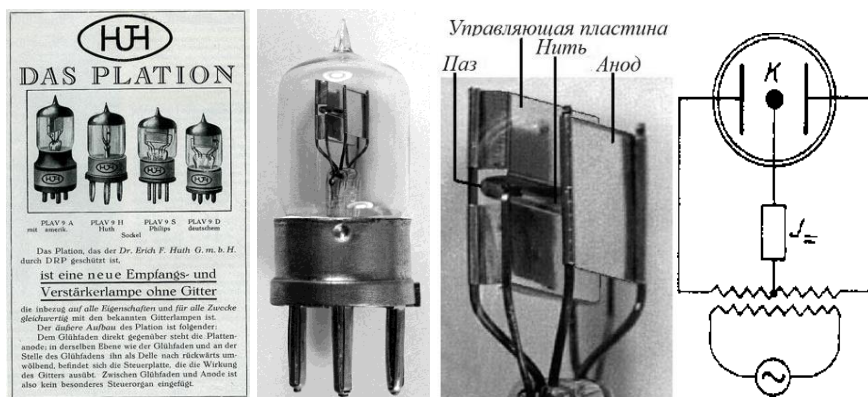


Рис. 19. Реклама триодов *Huth PLAV*. Опытный образец триода *PLAV 12* с цоколем *Huth*. Общий вид лампы триодной системы *Huth PLAV*. Принципиальная схема выпрямителя с некорректным использованием в качестве выпрямляющего устройства высоковакуумной лампы *Huth PLAV* [20].

Fig. 19. Advertisement for *Huth PLAV* triodes. A prototype of the *PLAV 12* triode with a *Huth* base. General view of the *Huth PLAV* triode system tube. Schematic diagram of a rectifier with incorrect use of a *Huth PLAV* high-vacuum tube as a rectifying device [20]

В рекламе *Plation* сообщается (рис. 19): «*Plation*, который представляет *Dr. Erich F. Huth G. M. B. H.* — это новая приемная и усилительная лампа без сетки, которая по всем характеристикам и для старых целей эквивалентна известным сеточным лампам.

Устройство *Plation* следующее. Управляющая пластина выполняет роль сетки и содержит углубление, в котором находится изгиб нити накала. Непосредственно напротив нити накала располагается пластинчатый

анод. Таким образом, между нитью накала и анодом нет специального органа управления».

Причина, по которой долгое время не удавалось создать пластинчатую лампу, эквивалентную известной сеточной лампе, по-видимому, связана с ошибочным выбором научного направления разработки. Усилия разработчиков всегда были направлены на то, чтобы сконструировать электронную лампу на низкое анодное напряжение. Мощность такой лампы, как отмечено в работе [17, р. 501], в лучшем случае составляла 0,6 мощности от обычной сеточной лампы на 90 вольт, то есть всего 0,2. И даже такая мощность была достигнута только за счет перегрузки катода. Кроме того, ток электронов, протекавший между катодом и контрольной пластиной, был непропорционально велик. Даже при напряжении отрицательной управляющей пластины более 1,5 В все равно можно было обнаружить измеримый ток. Наконец, немало трудностей вызвала механическая конструкция. Электроды и держатели нитей были изогнуты так, что невозможно было гарантировать желаемые расстояния.

10. Заключение

Исследования Халла по использованию магнитного управления термoeлектронными лампами (вакуумными лампами) в качестве альтернативы сеточному или электростатическому управлению привели его к изобретению динатронной вакуумной лампы. Вторичная эмиссия электронов с анода заставила динатрон вести себя как реальное отрицательное сопротивление, поэтому лампа могла генерировать колебания в широком диапазоне частот или использоваться в качестве усилителя. Когда между катодом и перфорированным анодом была добавлена управляющая сетка, устройство называли «плиодинатроном».

Лампа типа «негатрон», хотя не получила широкого применения, но ее схемное решение было использовано при разработке дифференциального усилителя.

Основное применение динатрона и негатрона, ламп отрицательного сопротивления, заключается в создании непрерывных колебаний для использования в беспроводной передаче или приеме методом биений. Более перспективной оказалась пластинчатая лампа «платин», но и она не смогла создать конкуренцию аудиону Ли де Фореста ввиду сложности технологии ее изготовления.

Список литературы

1. Suits C. G., Lafferty J. M. Albert Wallace Hull. 1880–1966. In : National Academy of Sciences Washington, 1970. P. 215–233.

2. Введенский Б. Динаatron. В кн. : Техническая энциклопедия. М. : ОГИЗ, 1932. Т. 6. С. 751—753.
3. Hull A. W. The Dynatron : A Vacuum Tube Possessing Negative Electric Resistance // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1918. Vol. 6, no 1. P. 5—35.
4. Tyers P. D. The dynatron // Modern Wireless. 1923. Vol. 1, no. 1. P. 29—31.
5. Hull A. W. Electron-discharge apparatus. Patent US1385873A. Patented July 26, 1921. Application filed June 6, 1916.
6. Hull A. W. The dynatron. A vacuum tube possessing negative electric resistance // Wireless Age. 1918. No. 8. P. 944—951.
7. A New Three – Electrode Vacuum Tube // The Wireless Age. 1920. No. 6. P. 16—17.
8. Электронные лампы специальной конструкции. В кн. : Справочная книга для элетриков. Под ред. М. Шателена, В. Миткевича, В. Толвинского. В 4-х тт. Т. 4. Ленинград : Изд-во КУБУЧ, 1929. С. 47—48.
9. Scott-Taggart J. Improvements in and relating to signaling systems. United Kingdom Patent GB191777. Application Date: 1921-09-12. Publication Date: 1923-01-12.
10. Scott-Taggart J. The Negatron – A New Negative Resistance Vacuum Tube // Wireless Age. 1922. No. 1. P. 23.
11. Leggat P. Scott Taggart's Negatron valve // BVWS Bulletin. 1994. Vol. 19, no. 4. P. 49—50.
12. Blumlein A. D. Improvements in or relating to Thermionic Valve Amplifying Circuit Arrangements. Patent GB482740A. Application Date: July 4, 1936. Complete Specification Left : June 30, 1937. Complete Specification Accepted : April 4, 1938.
13. Пестриков В. М. Генезис аудиона Ли де Фореста // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 1. С. 42—79.
14. Пестриков В. М. Лампы Arcotron. В сб. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. Т. 8. С. 1912—1924.
15. Rüchardt E. Ein Elektronenverstärker für niedrige Anodenspannung. In : Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie 15. 1920. H. 1. S. 27—39.
16. Rottgardt K. Das Plation. Die Antenne. 1924. 3. H. 1. S. 5—7.
17. Cohn H. Über die gitterlose Empfangsund Verstärkerlampe mit Steuerplatte (Plation). Zeitschrift für technische Physik. 1924. 5. H. 11. S. 500—505.
18. Cohn H. Thermic tube. Patent US1682775. Patented September 4, 1928. Application filed July 18, 1924 and in Germany September 18, 1923.
19. Börner H. Das Plation // Funkgeschichte. 2001. Jg. 24, nr. 137. S. 138—142.
20. Barkhausen H. Elektronen-Röhren. Leipzig : Hirzel, 1923. 124 s.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Special Types of Vacuum Tubes

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: April 29, 2024
Peer-reviewed: May 6, 2024
Accepted: May 6, 2024

Abstract: The article presents studies of three vacuum tubes that were supposed to compete with Lee de Forest's audion in order to circumvent his patents. American radio engineer Albert Hull of GE's research into the use of magnetic control in thermionic tubes, which led him to the invention of the dynatron, a negative-resistance vacuum tube, is detailed. Attention is also drawn to his other tube with negative resistance – the plyodinatron. Features of the use of dynatron and pliodinatron are noted. The Negatron tube, invented by British radio engineer John Scott-Taggart, is also considered. Attention is paid to a tube triode with a control flat non-solid electrode called "Plation". Mentioned is Henny Cohn's patent US1682775A for a plate tube triode design.

Keywords: Alberta Hull, dynatron, pliodinatron, John Scott-Taggart, negatron, plation. M. Seddig, Henny Cohn, Huth Company, Laboratorium der Dr. E. F. Huth G. M. B. H.

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Special Types of Vacuum Tubes," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 117–143, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.09. (In Russ.).

References

- [1] C. G. Suits and J. M. Lafferty. "Albert Wallace Hull. 1880–1966," in : *National Academy of Sciences Washington*, pp. 215–233, 1970.
- [2] B. Vvedensky, "Dynatron," in : *Technical encyclopedia*, vol. 6. Moscow : OGIz, pp. 751–753, 1932. (In Russ.).
- [3] A. W. Hull, "The Dynatron : A Vacuum Tube Possessing Negative Electrical Resistance," *Proc. of the Institute of Radio Engineers*, vol. 6, no 1, pp. 5–35, 1918.
- [4] P. D. Tyers, "The dynatron," *Modern Wireless*, vol. 1, no. 1, pp. 29–31, 1923.
- [5] A. W. Hull, Electron-discharge apparatus. Patent US1385873A. Patented July 26, 1921. Application filed June 6, 1916.
- [6] A. W. Hull, "The dynatron. A vacuum tube possessing negative electric resistance," *Wireless Age*, no. 8. pp. 944–951, 1918.
- [7] "A New Three – Electrode Vacuum Tube," *The Wireless Age*, no. 6, pp. 16–17, 1920.
- [8] "Specially designed electronic tubes," in : *Reference book for electricians*, ed. M. Chatelen, V. Mitkevich, V. Tolvinsky, vol. 4. Leningrad : KUBUCH Publ. house, pp. 47–48, 1929. (In Russ.).
- [9] J. Scott-Taggart, Improvements in and relating to signaling systems. United Kingdom Patent GB191777. Application Date: 1921-09-12. Publication Date: 1923-01-12.

- [10] J. Scott-Taggart, "The Negatron – A New Negative Resistance Vacuum Tube," *Wireless Age*, no. 1, p. 23, 1922.
- [11] P. Leggatt, "Scott Taggart's Negatron valve," *BVWS Bulletin*, vol. 19, no. 4, pp. 49–50, 1994.
- [12] A. D. Blumlein, Improvements in or relating to Thermionic Valve Amplifying Circuit Arrangements. Patent GB482740A. Application Date: July 4, 1936. Complete Specification Left: June 30, 1937. Complete Specification Accepted: April 4, 1938.
- [13] V. M. Pestrikov, "Genesis of Lee de Forest's audion," *Infocommunications and radio technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 42–79, 2021. (In Russ.).
- [14] V. M. Pestrikov, "Arcotron lamps," *28th International Crimean Conference "Microwave and Telecommunication Technology" (CriMiCo'2018)*, Sevastopol, September 9–15, 2018, vol. 8. pp. 1912–1924. (In Russ.).
- [15] E. Rüchardt, "Ein Elektronenverstärker für niedrige Anodenspannung," in : *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, 15, H. 1, S. 27–39, 1920. (In German).
- [16] K. Rottgardt, "Das Plation," *Die Antenne*, h. 1, s. 5–7, 1924. (In German).
- [17] H. Cohn, "Über die gitterlose Empfangsund Verstärkerlampe mit Steuerplatte (Plation)," *Zeitschrift für technische Physik*, h. 11, s. 500–505, 1924. (In German).
- [18] H. Cohn, Thermic tube. Patent US1682775. Patented September 4, 1928. Application filed July 18, 1924 and in Germany September 18, 1923.
- [19] H. Börner, "Das Plation," *Funkgeschichte*, Jg. 24, nr. 137, s. 138–142, 2001.
- [20] H. Barkhausen, *Elektronen-Röhren*, Leipzig : Hirzel, 1923.

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 7, no. 1, pp. 144–155, 2024.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 1. С. 144—155.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.10

УДК 621.396(091)

Новые успехи крымских радиолюбителей в области радиосвязей с космосом

Пузанков Л. А.

*Российский телеграфный клуб
Симферополь, Крым, Российская Федерация
r7ka@mail.ru*

Получено: 22 марта 2024 г.

Отрецензировано: 31 марта 2024 г.

Принято к публикации: 31 марта 2024 г.

Аннотация: В статье отмечена инициатива радиолюбителей Симферопольского колледжа радиоэлектроники (СКР) в проведении радиосвязей с российскими космонавтами в период их вахты на Международной космической станции (МКС). Инициаторы мероприятия (преподаватели и студенты колледжа) при решении этой задачи столкнулись с рядом проблем, которые с честью были преодолены. С учетом большой скорости пролета станции над Крымом и относительно непродолжительного периода радиовидимости особое внимание разработчиками идеи было уделено подбору необходимого количества и диаграмм направленности антенных устройств на крыше здания учебного корпуса колледжа.

Ключевые слова: Симферопольский колледж радиоэлектроники, Международная космическая станция, диаграмма направленности антенны.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пузанков Л. А. Новые успехи крымских радиолюбителей в области радиосвязей с космосом // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 144—155.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пузанков, Л. А. Новые успехи крымских радиолюбителей в области радиосвязей с космосом / Л. А. Пузанков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 144—155.

1. Введение

С запуском нашей страной первого в мире искусственного спутника Земли и полета в космосе нашего первопроходца Юрия Алексеевича Гагарина, девяностолетие которого мы отмечаем в этом году, открыло новые просторы для радиолюбительского творчества.

Юрий Алексеевич Гагарин родился 9 марта 1934 года в селе Клушино Смоленской области [1]. В послевоенные годы в 1948 году на смену общественной организации ОСОАВИАХИМ пришли добровольные общества содействия армии, авиации и флоту (ДОСАРМ, ДОСАВ и ДОСФЛОТ). Молодежь нашей страны стала активно вступать в эти общества. Автор этой статьи в 1950 году поступил на курсы авиаторов в Крымское отделение ДОСАВ, которое имело в своем распоряжении аэродром с самолетами в пос. Заводское, где курсанты занимались прыжками с парашютом, учились летать на самолетах. К сожалению, из-за ряда обстоятельств окончить курсы, к сожалению, мне не удалось.

В мае 1949 года Юрий Гагарин окончил шестой класс Гжатской средней школы и поступил в Люберецкое ремесленное училище по специальности формовщика-литейщика. Седьмой класс он оканчивал в вечерней школе в мае 1951 года. В августе 1951 года Гагарин поступил в Саратовский индустриальный техникум на литейное отделение, где помимо учёбы проявил себя как хороший физкультурник и секретарь ДСО «Трудовые резервы». 25 октября 1954 года впервые пришёл в Саратовский аэроклуб ДОСААФ СССР. В 1955 году Юрий Гагарин добился значительных успехов, окончив с отличием учёбу в аэроклубе, совершил на спортивном аэродроме Дубки первый самостоятельный полёт на самолёте Як-18. Всего в аэроклубе Юрий Гагарин выполнил 196 полётов и налетал 42 часа 23 мин! Поступив в отряд космонавтов и пройдя соответствующую подготовку, Юрий Алексеевич Гагарин 12 апреля 1961 года стал первым человеком в мировой истории, совершившим полёт в космическое пространство. Ракета-носитель «Восток» с кораблём «Восток-1», на борту которого находился Гагарин, была запущена с космодрома Байконур, расположенного в Кызылординской области Казахской ССР. После 108 минут полёта Гагарин успешно приземлился в Саратовской области, неподалёку от г. Энгельс. 12 апреля 1961 года, день полёта Юрия Гагарина в космос, был объявлен праздником — Днём космонавтики. Первый космический полёт вызвал большой интерес во всём мире, а сам Юрий Гагарин превратился в мировую знаменитость. По приглашениям зарубежных правительств и общественных организаций он посетил около 30 стран. Также у первого космонавта было много поездок и внутри Советского Союза. В последующие годы Гагарин вёл большую общественно-политическую работу, окончил Военно-воздушную инженерную академию имени профессора Н. Е. Жуковского, работал в Центре подготовки космонавтов и готовился к новому полёту в космос. 27 марта 1968 года Юрий Гагарин погиб в авиационной катастрофе вблизи деревни Новосёлово Киржачского района

Владимирской области, выполняя учебный полёт на самолёте МиГ-15УТИ под руководством инструктора В. С. Серёгина.

Благодаря покорению космоса человечеством радиолюбители в своей деятельности освоили новые для себя космические технологии. К этому следует отнести и радиосвязи через радиолубительские спутники-ретрансляторы, и радиосвязи с отражением сигналов от нашего ближайшего спутника Луны, и радиосвязи с использованием отражения радиосигналов от ионизированных следов влетающих в нашу атмосферу метеоров [2]. В последнее время появилось еще одно направление в радиолубительстве — радиосвязи с космонавтами, находящимися на борту космических станций. К гордости крымских радиолубителей следует отнести и это направление их деятельности.

2. Из истории любительских радиосвязей с космосом

В 1988 году с борта орбитального комплекса «Мир» впервые зазвучали позывные любительской радиостанции, которую прислала экипажу станции редакция журнала «Радио». Таким образом, благодаря инициативе сотрудников редакции была открыта эра любительской радиосвязи в длительных орбитальных полетах, которую разработал и реализовал Сергей Самбуров RV3DR. Космонавт Муса Манаров U2MIR, попавший весной того же года на борт «Мира», установил на внешней оболочке комплекса во время очередного выхода в открытый космос антенну для любительской радиосвязи. Орбитальный комплекс «Мир» просуществовал в космосе с 1986 по 2001 гг.

За время существования комплекса «Мир» и МКС (российский сектор) было организовано и проведено между экипажами космонавтов и школьниками (и студентами) нашей страны большое количество сеансов радиосвязи. Радиолубительский позывной наших космонавтов в последнее время был RS0ISS.

Следует отметить, что впервые в мире радиолубительская связь была проведена американскими астронавтами с помощью радиолубительской аппаратуры, установленной на космическом корабле «Шаттл» еще в 1983 году.

Известно, что в программу подготовки космонавтов включены занятия по изучению азбуки Морзе и правилам ведения любительской радиосвязи. Некоторые из космонавтов оформили индивидуальные любительские позывные. Среди них: Муса Хираманович Манаров, U2MIR; Александр Александрович Волков, U4MIR; Сергей Константинович Крикалёв, U5MIR; Анатолий Арцебарский, U7MIR. Следует отметить, что даже по-

сле окончания своей космической карьеры космонавт А. А. Волков продолжает активно работать в эфире из дома в Звездном городке своим персональным позывным *U4MIR*. Александр Волков является почетным членом радиолюбительского клуба «Рыцари неба».

Свои знания по радиолюбительскому обмену продемонстрировал 20 августа 1965 года Юрий Алексеевич Гагарин, который во время поездки во Всесоюзный пионерский лагерь «Артек» посетил там коллективную радиостанцию. По воспоминаниям начальника радиостанции лагеря Гавренко Бориса Павловича *UB5SY*, Юрий Гагарин на коллективке работал в диапазоне 20 метров телефоном (SSB) позывным *U5ARTEK/KEDR* («КЕДР») — позывной Гагарина во время первого полета человека в космос). Юрий Алексеевич провел несколько радиосвязей. На фотографии об этом событии Ю. А. Гагарин подписал: «Облетев Землю в корабле-спутнике, я увидел, как прекрасна наша планета. Люди, будем хранить и приумножать эту красоту, а не разрушать ее!» (Рис. 1).

Юрий Алексеевич Гагарин часто по работе выезжал в Центр управления полетами космических кораблей в Евпаторийский Центр дальней космической связи. По просьбе первого секретаря Евпаторийского горкома комсомола Нелли Сидоренко и начальника пионерского лагеря Владимира Францевича Ясинского 22 августа 1965 года Юрий Алексеевич Гагарин в период своего отпуска посетил пионерский лагерь в Евпатории. Это событие для многих участников встречи осталось в памяти на всю жизнь (Рис. 2).

Совсем недавно, 2 июня 2023 года, редакцию журнала «Радио» посетили важные гости. Это были Олег Германович Артемьев и Сергей Николаевич Самбуров. Несколько слов о гостях редакции. Олег Германович Артемьев — Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации, космонавт-испытатель 1-го класса, почетный гражданин городов Байконур, Гагарин и Снежинск, депутат Московской городской думы VII созыва с 2019 года и правнук К. Э. Циолковского. Сергей Николаевич Самбуров — Президент общественного фонда К. Э. Циолковского, действительный член Академии космонавтики, вице-президент *AMSAT-RUS* по пилотируемой программе, главный специалист ПАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева, руководитель радиолюбительской деятельности на орбитальном комплексе «Мир» и Международной космической станции. Гости за беседой рассказали сотрудникам редакции об интересных рабочих моментах в космосе, об этапах подготовки космонавтов и торжественно вручили редакции выпел с символикой журнала «Радио», побывавший в космосе на МКС. Олег Германович подарил редакции уникальную

книгу-справочник «С орбиты — на Землю», выпущенную к 60-летию полета первого космонавта Земли Юрия Гагарина. В заключение визита гости сфотографировались со всеми сотрудниками редакции на фоне флага редакции «Радио» [3].

3. Инициатива радиолюбителей Симферопольского колледжа радиоэлектроники

Как свидетельствуют факты, в настоящее время одной из активнейшей любительской радиостанции в Крыму является радиостанция Симферопольского колледжа радиоэлектроники (СКР) *R7KBR*. Открыта радиостанция была в 2017 году [4]. Возглавляет радиостанцию талантливый педагог колледжа Илья Ковалев *R7KAY* (рис. 3), заведующий несколькими лабораториями СКР. Он же — заместитель председателя Регионального отделения Союза радиолюбителей России (РО СРР) по Республике Крым, председатель квалификационной комиссии РО СРР. Функционирует эта любительская радиостанция колледжа в рамках программы дополнительного образования. Благодаря конструктивному подходу руководства колледжа (директор — Ольга Федоровна Касперова) к существованию в стенах колледжа любительской радиостанции была создана связь основной образовательной программы и программы дополнительного образования. Многие физические процессы, явления, и просто работу различной аппаратуры можно было продемонстрировать на практике. Работа в эфире для обучающихся стала хорошим мотиватором для углубления знаний по выбранной профессии. Симферопольский колледж радиоэлектроники успешно сотрудничает с Севастопольским государственным университетом, для чего между ними заключены соответствующие соглашения и активно проводятся совместные спортивные мероприятия.

Радиостанция колледжа не ограничивается лишь проведением радиосвязей в стенах учебного заведения. Коллектив радиостанции часто выезжает в горы Крыма (Ангарский перевал, г. Чатыр-Даг, Караби-яйла, Долгоруковская яйла и др.) для проведения радиосвязей в УКВ диапазоне и участия в соревнованиях (рис. 4). С учетом развития космических технологий и активного участия в них радиолюбителей коллектив симферопольского колледжа радиоэлектроники старается идти в ногу со временем.

В плане этих передовых тенденций коллектив радиостанции СКР в марте 2023 года организовал (впервые в Крыму) радиосвязь с любительской радиостанцией в российском сегменте Международной космической станции (МКС) *RS0ISS*. Известно, что позывной *RS0ISS* был добавлен в базу *qrz.ru* 17.11.2005 года.

4. Реализация замысла проведения радиосвязи

Инициатива планируемой радиосвязи с космонавтами принадлежала Илье Ковалеву. Для изучения такой возможности проведения радиосвязи с космонавтами Илья вышел на сайт Дмитрия Пашкова *R4UAB*. Оказалось, что Дмитрий — один из организаторов радиолюбительской космической программы для коллективных станций, детских и образовательных учреждений, по которой существует возможность проводить радиолюбительские связи с МКС. Начальник коллективной радиостанции СКР ознакомился с требованиями, подписал заявку у директора колледжа и отправил заявку по соответствующему адресу.

В заявке был составлен перечень вопросов для космонавтов, предполагаемый день и время сеанса связи, которые следовало рассчитать с помощью программы *Orbitron*. Был выбран наиболее удобный вариант на 13 марта 2023 года примерно на 21:25 МСК. На борту МКС в это время несли вахту российские космонавты: Дмитрий Александрович Петелин, Сергей Валерьевич Прокопьев и Андрей Валерьевич Федяев.

После отправки заявки началось томительное ожидание ответа от руководителя радиолюбительской деятельности на борту МКС Сергея Николаевича Самбура, *RV3DR*. После согласования деталей проведения сеанса в назначенный день в СКР прислали информацию о подтверждении планируемого мероприятия.

Несмотря на позднее время проведения сеанса связи, желающих присутствовать на коллективной радиостанции СКР оказалось более 30 студентов, с нетерпением ждавших вызов от *RS0ISS*. Движение МКС отслеживали через программу на компьютере. Когда станция пролетала над Эгейским морем, раздался четкий вызов «*R7KBR*, для вас — *RS0ISS...*», — ожидание было оправдано — мы слышим и нас слышат тоже! Космонавты работали на частоте 145.800 МГц, в режиме FM. На радиостанции *R7KBR* использовался трансивер *Yaesu FT1900*. Антенна — коллинеарная трёхсекционная 5/8 длины волны с круговой диаграммой направленности. С учетом того, что на крыше здания СКР не было направленной антенны, пришлось применять всенаправленную антенну. Прием был удовлетворительным. В период связи сказывался эффект Доплера — на таких скоростях движения космической станции частота «уходила» до нескольких килогерц. После приветствия, студенты (рис. 5) задали ряд вопросов космонавтам, связанных с бытом, досугом, задачами космонавтов и физическими явлениями, наблюдаемыми на борту МКС. Это мероприятие оказалось для участников очень интересным.

Конечно, радиосвязь была не совсем идеальна, наблюдались замирания сигналов, но большая часть информации была принята. Когда МКС

пролетала уже над Каспием, радиосвязь резко ухудшилась, ребята едва успели попрощаться с экипажем МКС. Всего радиоконтакт длился примерно 7 минут.

Студенты, принимавшие участие в радиосвязи с Международной космической станцией, получили на память бюст Ю. А. Гагарина, распечатанный позднее на 3D-принтере.

Первый сеанс связи радиолюбителей СКР из Крыма с МКС — знаменательное и уникальное событие.

Ко второй связи с российским экипажем МКС, которая была запланирована на 12 декабря 2023 года, коллектив радиостанции СКР подготовился более основательно. Для радиосвязи было установлено три приемопередатчика с тремя разными антеннами. Основным трансивером был *Icom*, к нему была подключена коллинеарная антенна, и две запасные радиостанции — «Алинка» с 5-элементной антенной «волновой канал», направленной вертикально вверх (это оказалось тактически правильным!) и трансивер *Yaesu* с J-антенной круговой направленности. Все это было сделано для того, чтобы учесть замирание сигналов с учетом разных диаграмм направленности антенн (рис. 6). Это хорошо было заметно при сеансе связи. Оказалось, что при пролёте МКС над нами по-разному принимались сигналы с приемников, поэтому оперативно подключался тот трансивер, на котором был более громкий и устойчивый сигнал. Для исключения возможных помех от источников питания по электросети трансиверы были запитаны от аккумуляторов. Так же, как и в первый сеанс связи, студенты (рис. 7) задали интересующие вопросы и получили исчерпывающие ответы от космонавта Николая Александровича Чуба. На борту МКС в этот период несли также вахту российские космонавты Константин Сергеевич Борисов и Олег Дмитриевич Кононенко. Сигналы *RS0ISS* принимались в Симферополе уверенно в течение всего сеанса связи без затуханий и потерь.

5. Заключение

Как преподаватель СКР Илья Ярославович Ковалев *R7KAY* считает, что подобные мероприятия способствуют расширению кругозора и резко повышают профессиональный интерес у студентов к своей уникальной профессии. С технической точки зрения организация таких радиосвязей с космическими объектами вполне решаема.

Надеемся, что подобные сеансы связи с объектами космоса в Симферопольском колледже радиоэлектроники станут традиционными. Особую благодарность педагогический коллектив, студенты и руководство СКР выражают С. Н. Самбурову *RV3DR* и Д. А. Пашкову *R4UAB* за помощь в организации и проведении сеансов связи с российскими космонавтами.

Радиолюбители СКР планируют и в дальнейшем проводить радиосвязи с нашими космонавтами, в том числе и с гор Крыма.

Примечание: Фотографии к статье — из архивов автора статьи и Ковалева И. Я.

Список литературы

1. Дни активности 9—17 марта 2024 «Ю. А. Гагарину — 90 лет». URL: <https://www.qrz.ru/awards.php/> (08.03.24).
2. Пузанков Л. А. История радиолюбительского движения и радиоспорта в Крыму. Симферополь : изд-во «Форма», 2023. 236 с.
3. [О посещении редакции журнала «Радио» Олегом Германовичем Артемьевым и Сергеем Николаевичем Самбуровым] / Радио. № 8, 2023 (цв. вставка).
4. Пузанков Л. (R7KA). Любительская радиостанция Симферопольского колледжа радиоэлектроники / Радио. 2019. № 11. С. 52—53.

Информация об авторе

Пузанков Леонид Александрович, член Российского телеграфного клуба, Симферополь, Крым, Российская Федерация.

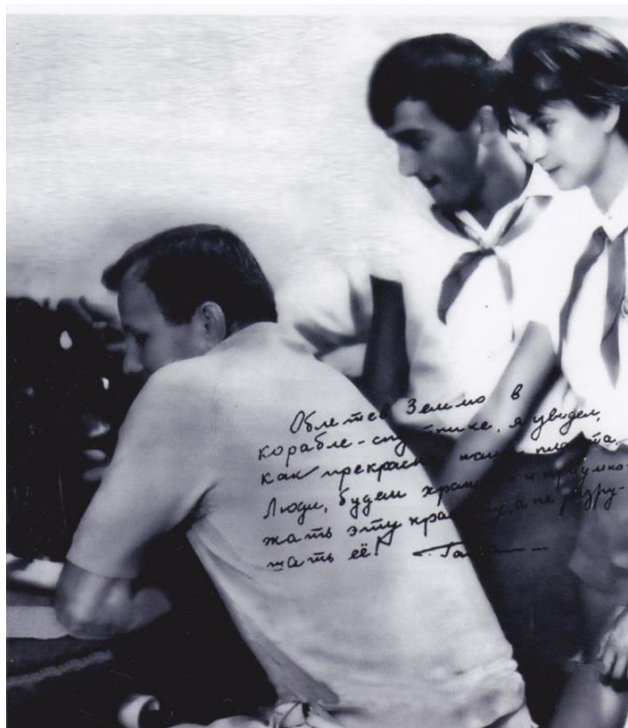


Рис. 1. Ю. А. Гагарин на радиостанции U5ARTEK. 1965 г.

Fig. 1. Yu. A. Gagarin on the radio station U5ARTEK. 1965



Рис. 2. Ю. А. Гагарин в гостях у пионеров Евпатории.
Fig. 2. Yu. A. Gagarin visiting the pioneers of Yevpatoriya



Рис. 3. Илья Ковалев R7KAY проверяет готовность трансивера к сеансу связи.
Fig. 3. Ilya Kovalev R7KAY checks the readiness of the transceiver
for a communication session



Рис. 4. R7KAY в полевых условиях.

Fig. 4. R7KAY in the field exercise



Рис. 5. Студенты колледжа в радиоклассе во время сеанса связи с российскими космонавтами.

Fig. 5. College students in a radio class during a communication session with Russian cosmonauts



Рис. 6. Радиоператор R7KBR Матвей Ласкин проводит радиосвязь с МКС.

Fig. 6. Radio operator R7KBR Matvey Laskin makes radio contact with the International Space Station

New Successes of Crimean Radio Amateurs in the Field of Radio Communications with Space

L. A. Puzankov

Russian Telegraph Club
Simferopol, Crimea, Russian Federation
r7ka@mail.ru

Received: March 22, 2024

Peer-reviewed: March 31, 2024

Accepted: March 31, 2024

Abstract: *The article notes the initiative of radio amateurs of the Simferopol College of Radio Electronics (SKR) in conducting radio communications with Russian cosmonauts during their watch on the International Space Station (ISS). The initiators of the event (teachers and college students) faced a number of problems when solving this problem, which were overcome with honor. Taking into account the high speed of the station's flight over the Crimea and the relatively short period of radio visibility, the developers of the idea paid special attention to selecting the required number and directional patterns of antenna devices on the roof of the college educational building.*

Keywords: *Simferopol College of Radio Electronics, International Space Station, antenna radiation pattern.*

For citation (IEEE): L. A. Puzankov, "New Successes of Crimean Radio Amateurs in the Field of Radio Communications with Space," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 144–155, 2023, doi: 10.1109/infocommunications.2024.07.1.10. (In Russ.).

References

- [1] Days of activity March 9–17, 2024 "Yu. A. Gagarin is 90 years old." URL: <https://www.qrz.ru/awards.php/> (03/08/2024). (In Russ.).
- [2] L. A. Puzankov, *The history of the amateur radio movement and radio sports in the Crimea*. Simferopol : Forma publ. house, 2023. (In Russ.).
- [3] [On the visit to the editorial office of the magazine "Radio" by Oleg Germanovich Artemyev and Sergei Nikolaevich Samburov], *Radio*, no. 8, 2023 (color insert). (In Russ.).
- [4] L. Puzankov (R7KA), "Amateur radio station of the Simferopol College of Radio Electronics," *Radio*, no. 11, pp. 52–53, 2019. (In Russ.).

Information about the author

Leonid A. Puzankov, member of the Russian Telegraph Club, Simferopol, Crimea, Russian Federation.

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Том 7, № 1, 2024 г.

С 15.04.2024 журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

1.3.1. Физика космоса, астрономия
(физико-математические науки),

1.3.4. Радиофизика
(физико-математические науки),

1.3.5. Физическая электроника
(физико-математические науки),

1.3.11. Физика полупроводников
(физико-математические науки)

2.2.1. Вакуумная и плазменная
электроника (технические науки),

2.2.2. Электронная компонентная
база микро и нанoeлектроники,
квантовых устройств
(технические науки),

2.2.3. Технология и оборудование
для производства материалов и
приборов электронной техники
(технические науки),

2.2.4. Приборы и методы измере-
ния (по видам измерений)
(технические науки),

2.2.5. Приборы навигации
(технические науки),

2.2.8. Методы и приборы контроля
и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды
(технические науки),

2.2.13. Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения
(технические науки),

2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства
и их технологии (технические
науки),

2.2.15. Системы, сети и устройства
телекоммуникаций
(технические науки),

2.2.16. Радиолокация и радио-
навигация (технические науки)

5.6.6. История науки и техники
(технические науки)

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

Адрес редакции: ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053
Тел. редакции: (8692) 41-77-41, <http://icrtjournal.com>, e-mail: icrt.mail@mail.ru

№ рег. СМИ: ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Главный редактор: Вольвач А. Е.

Подписано к печати 31.05.2024. Заказ 2400151. Дата выхода в свет: 08.09.2024. Тираж: 50 экз.
Свободная цена. Формат 64×90/16. Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 8,98
