

Российское НТО радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова
Уральский федеральный ун-тет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

2019
Том 2
№ 2

2019
Vol. 2
No. 2

Moscow • Ekaterinburg • Sevastopol

Почетный главный редактор

Президент РНТОРЭС им. А. С. Попова, академик РАН ГУЛЯЕВ Ю. В.

Главный редактор

д. ф.-м. н., проф. ХРАМОВ А. Е. (СГТУ, Саратов, Россия)

Редакционная коллегия

д. ф.-м. н., проф. АБРАМОВ И. И. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. ф.-м. н. ВОЛЬВАЧ А. Е. (КрАО, Крым, Россия)

д. т. н., проф. ГИМПЛЕВИЧ Ю. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. т. н., проф. ГРОМОВ Д. В. (МИФИ, Москва, Россия)

к. т. н. ЕРМОЛОВ П. П. (СевГУ, Севастополь, Россия — зам. главного редактора)

д. т. н., проф. ИВАНОВ В. Э. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

к. ф.-м. н. КОЛЕСОВ В. В. (ИРЭ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. ЛЕРЕР А. М. (ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия)

д. ф.-м. н., проф. МАГДА И. И. (ННЦ «ХФТИ», Харьков, Украина)

д. т. н., проф. НОСКОВ В. Я. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. ф.-м. н. ОБУХОВ И. А. (НПП «Системные ресурсы», Москва, Россия)

д. т. н., проф. ПЕСТРИКОВ В. М. (СПбГИКиТ, Санкт-Петербург, Россия)

д. ф.-м. н., проф. КУРАЕВ А. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. т. н., проф. СМОЛЬСКИЙ С. М. (МЭИ, Москва, Россия)

д. т. н., проф. СОВЛУКОВ А. С. (ИПУ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. СТАРОСТЕНКО В. В. (КФУ, Симферополь, Россия)

д. т. н., проф. ШИРОКОВ И. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

д. т. н., проф. АФОНИН И. Л. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. ф.-м. н., проф. БОГУШ В. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

проф. ИЛЬЧЕВ С. Д. (Durban University of Technology, South Africa)

проф. КАРМАКАР Н. Ч. (Monash University, Australia)

д. т. н., проф. КНЯЗЕВ С. Т. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. п. н. НЕЧАЕВ В. Д. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. т. н., проф. НОВИКОВ В. В. (ЧВВМУ им. П. С. Нахимова, Севастополь, Россия)

Заведующая редакцией: *Н. В. Папуловская*

Корректор: *С. В. Павлов*

Онлайн-сопровождение: *А. А. Кобелев*

Сайт журнала: icrtjournal.com

Подписано к печати 16.09.2019

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 12,54. Уч.-изд. л. 12,3. Тираж 300 экз.

Адрес редакции: ул. Мира, 32, Екатеринбург, 610002

Тел. +7 (978) 745-27-51, e-mail: icrt.mail@gmail.com

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Отпечатано в типогр. Printex

ул. Кулакова, 59а, Севастополь, 299011. Тел.: +7 8692 464 744, +7 8692 455 678

Honorary Chief Editor

President of RNTORES n. a. A. S. Popov, Academician of RAS GULYAEV Yu. V.

Editor in Chief

D.Sc., Prof. HRAMOV A. E. (SSTU, Saratov, Russia)

Editorial Board

D.Sc., Prof. ABRAMOV I. I. (BSUIR, Minsk, Belarus)

D.Sc. VOLVACH A. Ye. (CrAO, Crimea, Russia)

D.Sc., Prof. GIMPILEVICH Yu. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

D.Sc., Prof. GROMOV D. V. (MEPhI, Moscow, Russia)

C.Sc. YERMOLOV P. P. (SevSU, Sevastopol, Russia – Deputy Editor in Chief)

D.Sc., Prof. IVANOV V. E. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

C.Sc. KOLESOV V. V. (IRE of RAS, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. LERER A. M. (SFU, Rostov-on-Don, Russia)

D.Sc., Prof. MAGDA I. I. (KhIPT, Kharkov, Ukraine)

D.Sc., Prof. NOSKOV V. Ya. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc. OBUKHOV I. A. (Systems Resources Ltd., Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. PESTRIKOV V. M. (SPbSUFT, Saint-Petersburg, Russia)

D.Sc., Prof. KURAYEV A. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)

D.Sc., Prof. SMOLSKIY S. M. (MEI, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. SOVLUKOV A. S. (ICS of RAS, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. STAROSTENKO V. V. (CrFU, Simferopol, Russia)

D.Sc., Prof. SHIROKOV I. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

D.Sc., Prof. AFONIN I. L. (SevSU, Sevastopol, Russia)

D.Sc., Prof. BOGUSH V. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)

Prof. ILCEV D. S. (Durban University of Technology, South Africa)

Prof. KARMAKAR N. Ch. (Monash University, Victoria, Australia)

D.Sc., Prof. KNYAZEV S. T. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc. NECHAYEV V. D. (SevSU, Sevastopol, Russia)

D.Sc., Prof. NOVIKOV V. V. (P. S. Nakhimov ChHNS, Sevastopol, Russia)

Head of Editorial Board: *N. V. Papulovskaya*

Proofreaders: *S. V. Pavlov*

Online support: *A. A. Kobelev*

Address:

Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin

32, Mira Str., Ekaterinburg, 610002, Russian Federation

E-mail: icrt.mail@gmail.com

Website: icrtjournal.com

Содержание — Contents

Радиотехника и связь (05.12.00) — Radio engineering and communication

Потапов А. А. Избранные результаты теоретических и экспериментальных 40-летних исследований текстур, фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для решения задач радиофизики и радиоэлектроники. Часть 1. Математические основы и новые информационные технологии A. A. Potapov, Selected results of theoretical and experimental 40 years research of textures, fractals, fractional operators and scaling effects for solving problems of radio physics and radio electronics. Part 1. Mathematical foundations and new information technologies	128
Фридман Л. Б., Сеницын Е. А., Ершов Г. А. Компенсация активных помех в приемном тракте ретранслятора дальномера посадочной радиомаячной группы L. B. Fridman, E. A. Sinitsin, and G. A. Ershov, Compensation of active interference in receiving path of rangefinder repeater of the landing beacon group	139
Крутиев С. В., Земляков В. В., Клещенко А. Б. Синтез компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой S. V. Krutiev, V. V. Zemlyakov, and A. B. Kleshenkov, Synthesis of compact waveguide filters with an elliptic characteristic	145
Лонкина Д. В., Земляков В. В., Губский Д. С. Электродинамический анализ круглых волноводов со сложными металлическими гребнями и диэлектрическим заполнением D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, and D. S. Gubsky, Electrodynamics analysis of circular waveguide with complex metal ridges and dielectric filling	154
Фридман Л. Б., Сеницын Е. А., Ершов Г. А. Эффективность компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов при использовании сложных радиолокационных сигналов L. B. Fridman, E. A. Sinitsin, and G. A. Ershov, Effectiveness of compensation of active interference in the receiving paths of primary radars at usage of wideband radar signals	165
Сеницын Е. А., Фридман Л. Б., Ершов Г. А. Синтез и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией и минимальным уровнем боковых лепестков E. A. Sinitsin, L. B. Fridman, and G. A. Ershov, Synthesis and processing of pulse radar signals with nonlinear frequency modulation and minimum sidelobe level	174
Бутин В. И., Кундышев П. Я., Руденко Ю. А. Способ вычисления суммарной энергии поля СВЧ, образующейся в экранирующем корпусе, с использованием численных методов моделирования V. I. Butin, P. Ya. Kundyshev, and Y. A. Rudenko, Calculation of microwave energy accumulated inside the shielded volume of electronics using numerical simulation	180
Дурманов М. А., Бобошко А. В. Микрополосковая антенна круговой поляризации для приема сигналов GPS/ГЛОНАСС M. A. Durmanov and A. V. Boboshko, Microstrip circular polarization antenna for receiving GPS/GLONASS signals	192

Электроника (05.27.00) — Electronics

Морозова Е. К., Лялина А. М., Сапков И. В., Белоглазкина Е. К., Солдатов Е. С. Изготовление и исследование молекулярного одноэлектронного транзистора E. K. Morozova, A. M. Lyalina, I. V. Sapkov, E. K. Beloglazkina, and E. S. Soldatov, Production and research of a molecular single-electron transistor	204
---	-----

Торхов Н. А., 2 Новиков В. А. Исследование кристаллов AuNi/n-p ⁺ -GaN диодов Шоттки методами атомно-силовой микроскопии	
N. A. Torkhov and V. A. Novikov , Investigation of AuNi/n-p ⁺ -GaN crystals of Schottky diodes by atomic force microscopy	216
 <i>История науки и техники (07.00.10) — History of science and technology</i>	
Носков В. Я. Средства производственного контроля автодинных радиовзрывателей в период Второй мировой войны	
V. Ya. Noskov , Industrial check means of autodyne proximity fuses during World War II	227
Пузанков Л. А. Возникновение и история развития спортивной радиопеленгации в Крыму	
L. A. Puzankov , Emergence and history of development of radio direction finding sports in Crimea	245
Ермолов П. П., Коломийченко В. П., Свиридова Е. И. Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 2	
P. P. Yermolov, V. P. Kolomiychenko, and Ye. I. Sviridova , IEEE oral history project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 2	257
Пестриков В. М. Клапан Дж. А. Флеминга: предпосылки и его изобретение	
V. M. Pestrikov , Valve J. A. Fleming: background and its invention	264
Пестриков В. М. Электрический конденсатор — инновационная технология XVIII века	
V. M. Pestrikov , Electric capacitor – innovative technology of the XVIII century	285

УДК 537.86 + 621.37 + 621.396

Избранные результаты теоретических и экспериментальных 40-летних исследований текстур, фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для решения задач радиофизики и радиоэлектроники.

Часть 1. Математические основы и новые информационные технологии ¹

Потапов А. А.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009, Российская Федерация
potapov@cplire.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В работе представлены научные направления и основные полученные автором результаты по созданию новых информационных технологий на основе текстур, фракталов, дробных операторов и динамического хаоса. Исследования проводятся в рамках научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого автором в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 года по настоящее время. Введение в научный обиход радиолокации вышеупомянутых понятий позволило автору впервые в мире предложить, а затем и применить новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты, которые объединены под обобщенным понятием «топология выборки» ~ «фрактальная сигнатура». В части 1 представлены математические основы новых информационных технологий, предложенных автором.

Ключевые слова: радиофизика, радиолокация, нелинейная динамика, фрактал, текстура, дробный оператор, немарковский случайный процесс.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо-2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Потапов А. А. Избранные результаты теоретических и экспериментальных 40-летних исследований текстур, фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для решения задач радиофизики и радиоэлектроники. Часть 1. Математические основы и новые информационные технологии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 128—138.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Потапов, А. А. Избранные результаты теоретических и экспериментальных 40-летних исследований текстур, фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для решения задач радиофизики и радиоэлектроники. Часть 1. Математические основы и новые информационные технологии / А. А. Потапов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 128—138.

Selected results of theoretical and experimental 40 years research of textures, fractals, fractional operators and scaling effects for solving problems of radio physics and radio electronics. Part 1. Mathematical foundations and new information technologies

A. A. Potapov

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS
11/7, Mokhovaya Str., Moscow, 125009, Russian Federation
potapov@cplire.ru*

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: Research areas and main results on designing of the new information technologies on the basis of textures, fractals, fractional operators and dynamic chaos which were obtained by the author are presented in this work. The researches are conducted in the framework of scientific direction “Fractal radio physics and fractal radio electronics: designing of fractal radio systems”, which was initiated and is developed by the author in V. A. Kotel'nikov IREE RAS since 1979 and up to the present. Introduction of the conceptions above into the scientific usage of radio location allowed the author to propose and then to apply new dimensional and topological (not power!) signs or invariants for the first time in the world, which are united under a generalized conception “sampling topology” ~ “fractal signature”. Mathematical foundations of the new information technologies which were proposed by the author are presented in part 1.

Keywords: *radio physics, radio location, non-linear dynamics, fractal, texture, fractional operator, non-Markovin random process.*

For citation (IEEE): A. A. Potapov “Selected results of theoretical and experimental 40 years research of textures, fractals, fractional operators and scaling effects for solving problems of radio physics and radio electronics. Part 1. Mathematical foundations and new information technologies,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 128–138, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.11

1. Введение

В настоящее время в радиофизике, радиоэлектронике и обработке сигналов преимущественно, привычно и повсеместно используются целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссовская статистика, марковские процессы и т.п. [1, 2]. Интенсивное развитие современной радиолокационной техники и технологий ставит перед теорией радиолокации и новые требования. Одни из этих требований не затрагивают основ теории и сводятся к увеличению точности, улучшению существующих и разработке новых методов расчета, другие же являются более фундаментальными и касаются основ теоретической радиолокации. Эти требования представляются наиболее важными как в теоретическом, так и в практическом плане, что и рассмотрено в данной работе.

Отметим, что к главнейшим проблемам радиофизики относятся вопросы радиолокационного обнаружения высокоскоростных, малозаметных и малогабаритных объектов вблизи поверхности земли и моря, а также в метеорологических осадках, что представляет крайне трудную задачу при высокоскоростных целях и непредсказуемых траекториях. Кроме того, помехи от морской поверхности и растительности имеют нестационарный и многомасштабный характер, особенно при малых углах скольжения ϑ . В последнее время появляется все больше различных видов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Благодаря их малым габаритам, а также использованию в их конструкциях пластмасс, стекловолокна, пенопласта, даже картона и других слабоотражающих электромагнитные волны материалов, БПЛА имеют небольшую эффективную отражающую способность. Отношение сигнал/помеха q_0^2 для перечисленных выше задач почти всегда заполняет область отрицательных (в децибелах) значений, т.е. $q_0^2 < 0$ —1 дБ. Как хорошо известно, при экспериментах по рассеянию метровых, дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн перед исследователями возникли вопросы правомерности и применимости гауссовских моделей. Вскоре начались многочисленные искусственные попытки

создания моделей рассеяния с целью повышения уровня «хвостов» вероятностных распределений амплитуд отраженных сигналов.

Все это делает трудно применимым классические радиолокационные методы и алгоритмы обнаружения, т.е. использование энергетических обнаружителей (отношение правдоподобия определяется исключительно энергией принимаемого сигнала) становится принципиально невозможным. Обнаружение малоконтрастных объектов на фоне указанных выше естественных интенсивных помех неизбежно требует введения и вычисления некоторой принципиально новой характеристики, которая отличается от классических функционалов, связанных с энергией помех и сигнала, а определяется исключительно *топологией* и *размерностью* принятой смеси сигнала с помехами и шумами.

В статье представлены основные направления внедрения текстур, фракталов, дробных операторов и методов нелинейной динамики в фундаментальные задачи радиофизики, радиолокации и широкий спектр радиотехнических наук для создания новых информационных технологий. Исследования проводятся в рамках научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого автором в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 года по настоящее время.

2. Математические основы фрактально-скейлингового метода

Актуальность проведения данных исследований связана с необходимостью более точного описания реальных процессов, происходящих в радиофизических и радиотехнических системах. Это, прежде всего учет эргодичности, негауссовости и скейлинга (самоподобия, автомодельности) физических сигналов и полей. Все эти понятия входят в описание фрактальных множеств или фракталов, впервые предложенных в 1975 г. Б. Мандельбротом [3].

При фрактально-скейлинговом подходе, предложенном и развиваемом автором в течение 40 лет, описание и обработка сигналов и полей проводится исключительно в пространстве дробной меры с применением гипотез скейлинга, негауссовских устойчивых распределений с тяжелыми хвостами и, по возможности, с применением аппарата дробных интегро-производных. Заметим, что наличие в уравнениях дробной производной по времени интерпретируется как наличие памяти или, в случае стохастического процесса, — немарковости.

1. Основным свойством фракталов является нецелое значение их размерности D . Понятие меры и размерности Хаусдорфа [4] определяется p -

мерной мерой с произвольным вещественным положительным числом p , которую ввел Хаусдорф в 1919 г. Понятия, введенные Хаусдорфом, основываются на конструкции Каратеодори (1914 г.). Размерность Хаусдорфа $\dim_H A$ определяется через хаусдорфову α -меру $mes_{H,\alpha}$ множества в виде

$$mes_{H,\alpha} = \liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{\Gamma(A)} [d(U)]^\alpha, \quad (1)$$

где нижняя грань $\inf$ берется по конечным или счетным покрытиям Γ множества A шарами U , диаметр которых $d(U) < \varepsilon$.

Размерность $\dim_H A$ определяется как такое число α_0 , что мера (1) при $\alpha > \alpha_0$ равна нулю, а при $\alpha < \alpha_0$ — бесконечности. В общем случае понятие меры не связано ни с метрикой, ни с топологией. Однако мера Хаусдорфа может быть построена в произвольном метрическом пространстве на основе его метрики, а сама размерность Хаусдорфа связана с топологической размерностью. В ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН были разработаны различные оригинальные методы измерения фрактальной размерности D , в том числе дисперсионный, учет сингулярностей, по функционалам, триадный, на основе метрики Хаусдорфа, вычитания выборок, на основе операции «Исключающее ИЛИ» и т. п. [5—7].

Локально-дисперсионный метод измерений фрактальной размерности D основан на измерении дисперсии интенсивности/яркости σ_i^2 фрагментов оптического или радиолокационного изображения на двух пространственных масштабах δ_i^2 :

$$D \approx \frac{\ln \sigma_2^2 - \ln \sigma_1^2}{\ln \delta_2 - \ln \delta_1}, \quad i = 1 \text{ или } 2. \quad (1)$$

В гауссовском случае дисперсионная размерность случайной последовательности сходится к размерности Хаусдорфа соответствующего стохастического процесса. Принципиальная сложность состоит в том, что любой численный метод включает дискретизацию (или дискретную аппроксимацию) анализируемого процесса или объекта, а дискретизация разрушает фрактальные свойства. Для разрешения этого противоречия необходима разработка специальной теории, основанной на методах фрактальной интерполяции и аппроксимации.

Фрактальная размерность D или ее сигнатура $D(t, f, \vec{r})$ в различных участках изображения поверхности является мерой текстуры [5, 6]. Фрактальные методы могут функционировать на всех уровнях сигнала: амплитудном, частотном, фазовом и поляризационном.

2. Дробный математический анализ имеет давнюю историю и чрезвычайно богатое содержание [5, 6, 8—10]. Интерес к дробному математическому анализу возник почти одновременно с появлением классического анализа (ещё в 1695 г. Г. Лейбниц упоминал об этом в письмах к Г. Лопиталю при рассмотрении дифференциалов и производных порядка $\frac{1}{2}$). Следует отметить цикл работ чл.-корр. Петербургской Академии наук (1884 г.) А. В. Летникова, который за время своей 20-летней научной деятельности разработал полную теорию дифференцирования с произвольным указателем [5, 6, 10]. В настоящее время наиболее часто используется выражение дробной производной D_{at}^α в форме, предложенной Риманом и Лиувиллем, — ${}_{RL}D_{at}^\alpha$. Оператор интегриродифференцирования в смысле Римана — Лиувилля дробного порядка $\alpha \in R$ с началом в точке a определяется следующим образом [5, 6, 8—10]:

$${}_{RL}D_{at}^\alpha f(t) = \frac{\text{sign}(t-a)}{\Gamma(-\alpha)} \int_a^t \frac{f(\tau)}{|t-\tau|^{\alpha+1}} d\tau, \quad \alpha < 0, \quad (2)$$

$${}_{RL}D_{at}^\alpha f(t) = f(t), \quad \alpha = 0, \quad (3)$$

$${}_{RL}D_{at}^\alpha = \text{sign}^n(t-a) \frac{d^n}{dt^n} D_{at}^{\alpha-n} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} f(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $n-1 < \alpha \leq n$, $n \in N$; $\text{sign}(z)$ определяется равенствами $\text{sign } 0 = 0$, $\text{sign } z = z/|z|$, ($z \neq 0$); $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция.

Для дифференцируемых на отрезке $[a, b]$ функций определения дробных производных по Риману — Лиувиллю и Летникову эквивалентны.

В настоящее время достаточно широко используется формулировка Капуто [5, 6, 8—10]:

$${}_CD_{at}^\alpha f(t) = \text{sign}^n(t-a) {}_{RL}D_{at}^{\alpha-n} f^{(n)}(t), \quad n-1 < \alpha \leq n, \quad n \in N. \quad (5)$$

Производные Римана — Лиувилля и Капуто связаны соотношением:

$${}_CD_{at}^\alpha f(t) = {}_{RL}D_{at}^\alpha f(t) - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(k)}(\tau)}{\Gamma(k-\alpha+1)} |\tau-t|^{k-\alpha}, \quad n-1 < \alpha \leq n, \quad n \in N. \quad (6)$$

В случае $\alpha = n$ получаем

$${}_{RL}D_{at}^n f(t) = {}_CD_{at}^n f(t) = \text{sign}^n(t-a) \frac{d^n}{dt^n} f(t), \quad n \in N. \quad (7)$$

Производная Капуто имеет ту же самую физическую интерпретацию, что и производная Римана — Лиувилля. В частности, при $f(0) = 0$ и $0 < \alpha < 1$ имеем точное равенство

$${}_C D_{0t}^{\alpha} f(t) = {}_{RL} D_{0t}^{\alpha} f(t). \quad (8)$$

При сравнении этих производных следует обратить внимание на то, что для расчета производной Римана — Лиувилля необходимо знание значений функции, а для производной Капуто — ее производных, что намного сложнее. Некоторое достоинство производной Капуто состоит в том, что она равна нулю для постоянной функции, что более привычно для исследователя.

3. В основе современной теории вероятностей лежат предельные теоремы о сходимости распределений сумм независимых случайных величин к так называемым устойчивым распределениям: гауссовским или негауссовским. Первые опираются на центральную предельную теорему, а вторые (негауссовские) — на предельную теорему, доказанную Б. В. Гнеденко (1939 г.) и В. Дёблин (1940 г.) [11]. В этом случае предельная теорема накладывает ограничения на форму негауссовских распределений. Для того чтобы закон распределения $F(x)$ принадлежал области притяжения устойчивого закона с характеристическим показателем α ($0 < \alpha < 2$), отличного от гауссовского, необходимо и достаточно, чтобы

$$1) \quad \frac{F(-x)}{1-F(x)} \rightarrow \frac{c_1}{c_2} \quad \text{при } x \rightarrow \infty, \quad (9)$$

$$2) \quad \frac{1-F(x)+F(-x)}{1-F(kx)+F(-kx)} \rightarrow k^{\alpha} \quad \text{при } x \rightarrow \infty, \quad (10)$$

где коэффициенты $c_1 \geq 0$, $c_2 \geq 0$, $c_1 + c_2 > 0$, $0 < \alpha < 2$, $k > 0$.

Для доказательства (9) и (10) необходимо и достаточно, чтобы при некотором подборе постоянных B_n , выполнялись условия [11, с. 189]:

$$nF(B_n x) \rightarrow \frac{c_1}{|x|^{\alpha}} \quad (x < 0), \quad n[1-F(B_n x)] \rightarrow \frac{c_2}{x^{\alpha}} \quad (x > 0), \quad (11)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} n \left\{ \int_{|x| < \varepsilon} x^2 dF(B_n x) - \left[\int_{|x| < \varepsilon} x dF(B_n x) \right]^2 \right\} = 0. \quad (12)$$

Чем меньше величина α , тем длиннее хвост распределения и тем более оно отличается от гауссовского. При $1 < \alpha < 2$ устойчивые законы имеют математическое ожидание; при $0 < \alpha \leq 1$ устойчивые законы не имеют ни дисперсий, ни математических ожиданий. Условиями (9)—(12) определяется так называемая *негауссовская статистика*.

В обычной статистике флуктуации стремятся к нулю, когда размер выборки или число слагаемых N возрастает. Это гарантирует асимптотически точную повторяемость средних значений и является источником

традиционных успехов классических статистических методов в радиолокации. Для статистики Леви ситуация может отличаться радикально. При увеличении размера выборки точность статистических оценок не улучшается! Стандартная форма центральной предельной теоремы предсказывает исчезновение флуктуаций при больших N , а из обобщенной центральной предельной теоремы (при $\alpha < 1$) следует, что флуктуации существенны при сколь угодно больших N . Одновременно при $\alpha < 1$ наблюдается случай глобальной неэргодичности процессов.

Отметим еще одно обстоятельство. Нецелые значения показателя α в диапазоне $1 < \alpha \leq 2$ соответствуют обобщенному броуновскому движению с долговременными корреляциями и статистическим самоподобием, т.е. фрактальному процессу. Математическим выражением самоподобия являются степенные законы. Фрактальная размерность пространства вероятностей временного ряда равна показателю α :

$$\alpha = 1/H. \quad (13)$$

где H — показатель Херста. Необходимо различать «обычную» фрактальную размерность D исследуемого сигнала или изображения и фрактальную размерность, определяемую показателем α . Если D характеризует «изломанность» объектов, то α характеризует толщину хвостов вероятностных распределений [5, 6].

3. Основные научные направления

1. Разработка новых информационных технологий для современных бортовых и наземных комплексированных радиотехнических систем дистанционного зондирования и мониторинга окружающей среды, радиолокации, радиовидения и навигации, функционирующих в диапазонах оптических, миллиметровых и сантиметровых волн (ММВ и СМВ). Теоретические и экспериментальные исследования рассеяния и распространения радиоволн с учетом пространственно-неоднородных характеристик зондируемой среды.

2. Фундаментальные исследования в области текстурных и фрактальных подходов к проблемам радиофизики, радиотехники, радиолокации, электродинамики, электроники, управления и широкого спектра смежных научных и технических направлений. Построение моделей соответствующих эргодичных нелокальных реальных стохастических процессов.

3. Применение корреляционно-экстремальных методов для решения задач информационного поиска, обнаружения, измерения характеристик и сопровождения динамических фрактальных и не фрактальных объектов на

стохастических изображениях. Такие задачи возникают в радиолокации, исследовании природных ресурсов, дистанционном зондировании, навигации, метеорологии, обработке информации с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), медицине, биологии, при автоматизации научных исследований и т. д.

4. Разработка теории и проведение экспериментальных исследований широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП) процессов и сигналов. Разработка фрактальных и нелинейных ШП и СШП сигналов, включая принципиально новые типы сигналов (*H*-сигналы).

5. Развитие и разработка математических, в том числе текстурных и фрактальных, методов обработки оптических и радиолокационных изображений в информационных системах различного назначения (радиолокация, медицина, материаловедение, нанотехнологии, сканирующие зондовые микроскопы, астрономия и т. д.).

6. Разработка и создание радиоэлектронных устройств для реализации математических фрактальных методов обнаружения сверхслабых многомерных сигналов на фоне интенсивных негауссовских помех для информационных систем нового поколения.

7. Физика основного уравнения радиолокации при зондировании фрактальных объектов и случайно-неоднородных сред. Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация, фрактальные многочастотные ММО-системы.

8. Теория дифракции волн на фрактальной многомасштабной поверхности. Многократное рассеяние волн во фрактальных дискретных случайно-неоднородных средах с точки зрения радиолокации самоподобных множественных групповых целей. Волны в неупорядоченных больших фрактальных системах (радиолокация, наносистемы, кластеры беспилотных летательных аппаратов и малоразмерных космических аппаратов, космический мусор и т. п.).

9. Применение теории фракталов в адаптивных популяционных методах формирования динамических группировок БПЛА с организацией «распределенного интеллекта», коллективного взаимодействия БПЛА в группе и в обработке поступающей информации с точки зрения теории их эффективного применения. Разработка решений в рамках понятия распределенной измерительной среды, когда каждая точка некоторой динамической среды способна выполнять сенсорные, измерительные и информационные функции, а также, на основе фрактально-графового подхода, позволяющего изучать рост сложных сетей и метод манипулирования такими сетями на глобальном уровне без детального описания.

10. Формулировка основ фрактальной парадигмы и глобального фрактально-скейлингового метода. Разработка и развитие функционального принципа «Максимум топологии при минимуме энергии» для принимаемого сигнала, позволяющий более эффективно использовать преимущества фрактально-скейлинговой обработки поступающей информации.

4. Заключение

Выполненные исследования [2, 5—7, 10, 12—14] являются приоритетными в мире и служат базой для дальнейшего развития и обоснования практического применения фрактально-скейлинговых и текстурных методов в современной радиофизике, радиолокации и нанотехнологиях, а также в совершенствовании принципиально новых и более точных фрактально-текстурных (топологических) методов обнаружения и измерения параметров сигналов в пространственно-временном радиолокационном канале. Отметим, что прослеживаются глубокие аналогии между созданным автором фундаментальным научным направлением и современной теорией фазовых переходов и критических явлений. По монографиям А.А. Потапова поставлены разнообразные курсы лекций по фракталам в радиофизике и радиоэлектронике в различных университетах России и стран ближнего зарубежья. На 2019 год результаты фундаментальных исследований автора отражены в более чем 1050 работах и 38 книгах и главах в них на русском и английском языках [14].

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена в рамках государственного задания и была частично поддержана Международным научно-техническим центром (проект № 0847.2, 2000—2005, США), Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ №05-07-90349, 07-07-07005, 07-07-12054, 07-08-00637, 11-07-00203, 18-08-01356-а), а также проектом “Leading Talents” (проект № 00201502, 2016—2020) в Джинанском университете (Гуанджоу, Китай).

Список литературы

1. Skolnik M. I. Radar Handbook. 3rd ed. New York, McGraw Hill, 2008. 1352 p.
2. Бункин Б. В., Реутов А. П., Потапов А. А. и др. Вопросы перспективной радиолокации. М. : Радиотехника, 2003. 512 с.
3. Mandelbrot B. Fractals : Fractals : Form, Chance, and Dimension. San Francisco : Freeman, 1977. 365 p.
4. Rogers C. A. Hausdorff Measures. London : Cambridge Univ. Press, 1970. 179 p.
5. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М. : Логос, 2002. 664 с.
6. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации : Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Университетская книга, 2005. 848 с.

7. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Пахомов А. А., Герман В. А. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А. А. Потапова. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
8. Oldham K. B., Spanier J. The Fractional Calculus. N.Y. : Acad. Press, 1974. 234 p.
9. Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск : Наука и техника, 1987. 688 с.
10. Потапов А. А., Черных В. А. Дробное исчисление А. В. Летникова в физике фракталов. Saarbrücken : LAMBERT Academic Publ., 2012. 688 с.
11. Гнеденко Б. В., Колмогоров А. Н. Предельные распределения для сумм независимых случайных величин. М. ; Л. : Гостехтеориздат, 1949. 264 с.
12. Потапов А. А. О стратегических направлениях в синтезе новых видов радиолокационных текстурно-фрактальных обнаружителей малоконтрастных объектов с выделением их контуров и локализацией координат на фоне интенсивных помех от поверхности земли, моря и осадков // Труды IV Всероссийской НТК «РТИ Системы ВКО – 2016», посв. 100-летию НИИДАР и 70-летию РТИ им. академика А. Л. Минца (Москва, 2—3 июня 2016 г.). М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 438–448.
13. Гуляев Ю. В., Потапов А. А. Применение теории фракталов, дробных операторов, текстур, эффектов скейлинга и методов нелинейной динамики в синтезе новых информационных технологий для задач радиоэлектроники (в частности, радиолокации) // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 9. С. 839—854.
14. Профессор Александр Алексеевич Потапов. Биобиблиографический указатель / Под ред. академика Ю. В. Гуляева. М. : 2019. 256 с.

Информация об авторе

Потапов Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, академик Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова и академик РАЕН, почетный профессор Евразийского национального университета (Астана, Казахстан), почетный профессор Джинанского университета (Гуанджоу, Китай), Президент совместной китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов, профессор Казанского государственного технического университета (КАИ) им. А. Н. Туполева, действительный член Вневедомственного экспертного совета по проблемам воздушно-космической сферы, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация.

Information about the author

Alexander A. Potapov, Dr. Sci. (Phys.-Math), academician of the Academy of Engineering Science of A. M. Prokhorov, academician of Russian Academy of Natural Sciences, honorary professor of the Eurasian National University (Kazakhstan, Astana), honorary professor of the University of Jinan (China, Guangzhou), President of the Sino-Russian Laboratory of Informational Technologies and Signals Fractal Processing, professor of Kazan State Technical University of A.N. Tupolev, full member of nonprofit non-government expert society on space threat defense, chief scientific researcher of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.396.62

Компенсация активных помех в приемном тракте ретранслятора дальногомера посадочной радиомаячной группы¹

Фридман Л. Б., Сеницын Е. А., Ершов Г. А.

*Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт
радиоаппаратуры»
пр. Обуховской обороны, 120, Санкт-Петербург, 192012, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: *Выполнен анализ эффективности метода адаптивной компенсации активных помех при его использовании в приемном тракте ретранслятора дальногомера посадочной радиомаячной группы. При этом рассмотрен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области, отличающийся тем, что позволяет компенсировать активные помехи (в частности, сигналы цифрового телевидения и сотовой связи) при наличии их переотражений от местных предметов и подстилающей поверхности. Получена зависимость эффективности компенсации активной помехи в спектральной области от порядка быстрого преобразования Фурье при наличии переотражений помехи. Предложен способ повышения эффективности адаптивной компенсации активных помех в приемном тракте ретранслятора дальногомера путем увеличения порядка быстрого преобразования Фурье. Выполнена сравнительная оценка эффективности компенсации активных помех в приемном тракте ретранслятора дальногомера посадочной радиомаячной группы и средств вторичной радиолокации.*

Ключевые слова: *посадочная радиомаячная группа, ретранслятор дальногомера, активные помехи, адаптивная компенсация, быстрое преобразование Фурье.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Фридман Л. Б., Сеницын Е. А., Ершов Г. А. Компенсация активных помех в приемном тракте ретранслятора дальногомера посадочной радиомаячной группы // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 2. С. 139—144.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Фридман, Л. Б. Компенсация активных помех в приемном тракте ретранслятора дального посадочной радиомаячной группы / Л. Б. Фридман, Е. А. Синицын, Г. А. Ершов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 119—128.

Compensation of active interference in receiving path of rangefinder repeater of the landing beacon group

L. B. Fridman, E. A. Sinitsyn, and G. A. Ershov

Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”
120, Pr. Obukhovskoi Oborony, St.-Petersburg, 192012, Russian Federation
lenya2002@bk.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The effectiveness analysis of the adaptive method of active interference compensation is performed. This method is intended for usage in receiving paths of rangefinder repeater of the landing beacon group. The adaptive method performs compensation in the spectral domain and allows compensating active interference (particularly, digital television and cellular telecommunication) in its multipath propagation (caused by ground clutter). The dependence between compensation effectiveness and the order of the fast Fourier transform under conditions of multipath propagation is obtained. The method for improving the compensation effectiveness by increasing the order of fast Fourier transform is proposed. The comparative evaluation of the effectiveness of active interference compensation in receiving paths of rangefinder repeater and secondary surveillance radars is carried out.

Keywords: landing beacon group, rangefinder repeater, active interference, adaptive compensation, fast Fourier transform.

For citation(IEEE): L. B. Fridman et al. “Compensation of active interference in receiving path of rangefinder repeater of the landing beacon group,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 139–144, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.12

1. Введение

Приемный канал («борт-земля») ретранслятора дального посадочных радиомаячных групп (ПРМГ) [1, 2] работает в диапазонах частот, которые частично используются сотовой связью, системами LTE и цифро-

го телевидения, что ведет к образованию взаимных межсистемных помех. В [3, 4] был предложен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области, отличающийся тем, что позволяет компенсировать активные помехи при их многопутевом распространении, вызванном наличием переотражений от местных предметов и подстилающей поверхности. В [3] были приведены результаты полигонных испытаний экспериментального образца адаптивного компенсатора активных помех (АКТП), реализованного на основе указанного метода. При этом в [3] было показано, что использование АКТП в приемных трактах вторичных радиолокаторов (ВРЛ) системы управления воздушным движением [5] позволяет улучшить отношение сигнал/помеха (ОСП) на величину порядка 30 дБ.

В настоящее время в АО «ВНИИРА» разрабатывается опытный образец новой посадочной радиомаячной группы [6, 7], что определяет актуальность вопросов использования метода адаптивной компенсации в приемном тракте РД.

В данной работе выполнен анализ эффективности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемном тракте РД ПРМГ. При этом для повышения эффективности компенсации активных помех при их многопутевом распространении предлагается существенно повысить порядок быстрого преобразования Фурье (БПФ), используемого при компенсации в спектральной области.

2. Особенности математического моделирования при учете переотражений активной помехи

Анализ эффективности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемном тракте РД ПРМГ был проведен с помощью математического моделирования в программной среде “Matlab”. Активная помеха рассматривалась как стационарный шумоподобный комплексный гауссовский случайный процесс.

В реальных условиях, кроме активной помехи $\dot{a}_n(t)$, на вход антенны поступает ряд ее переотражений

$$\dot{a}_\Sigma(t) = \dot{a}_n(t) + \sum_{i=2}^N \dot{a}_n(t - \tau_i) \cdot \dot{K}_{a_i} = \sum_{i=1}^N \dot{a}_n(t - \tau_i) \cdot \dot{K}_{a_i},$$

где τ_i и $\dot{K}_{a_i}$ — соответственно задержка и коэффициент ослабления i -го переотражения в основном приемном канале; N — количество учитываемых переотражений; $\tau_1 = 0$, $\dot{K}_{a_1} = 1$.

3. Анализ эффективности метода адаптивной компенсации активных помех

В [3] было показано, что дальнейшее повышение эффективности компенсации активной помехи в условиях ее переотражений может быть достигнуто путем повышения порядка БПФ, используемого при компенсации в спектральной области. Однако при повышении порядка БПФ увеличивается время усреднения весовых коэффициентов [3, 4], используемых при компенсации (время адаптации). При компенсации помехи в приемных трактах ВРЛ время адаптации ограничено, т.к. весовые коэффициенты должны успевать отслеживать постоянное изменение коэффициента передачи приемного канала, вызванное непрерывным вращением антенны ВРЛ в азимутальной плоскости [8]. Таким образом, эффективность компенсации активной помехи в приемных трактах ВРЛ ограничена и определяется прежде всего скоростью вращения антенны ВРЛ. В то же время, антенна РД ПРМГ является неподвижной (а ее диаграмма направленности не меняет направления), что позволяет значительно повысить порядок БПФ с целью повышения эффективности компенсации активной помехи в приемном тракте РД.

На рис. 1 показаны результаты выполненного анализа эффективности метода адаптивной компенсации при различных величинах порядка БПФ в случае наличия одного переотражения активной помехи. Как следует из рис. 1, увеличение порядка БПФ приводит к значительному повышению эффективности адаптивной компенсации. В частности, при увеличении порядка БПФ с 256 до 8192 ОСП повысилось более чем на 15 дБ (улучшение ОСП повысилось с 30,5 до 46 дБ).

Таким образом, при использовании метода адаптивной компенсации в приемном тракте РД может быть обеспечена значительно большая эффективность компенсации активных помех, чем при рассмотренном в [3, 4] использовании указанного метода в приемном тракте ВРЛ. Повышенная эффективность использования метода в приемном тракте РД обусловлена неподвижностью антенны РД (и постоянным направлением ее диаграммы направленности), что позволяет значительно увеличить порядок БПФ. При этом величина порядка БПФ (и, как следствие, коэффициент улучшения ОСП) практически ограничены лишь количеством вычислительных ресурсов, используемых при выполнении операции БПФ).

4. Заключение

Увеличение порядка БПФ, используемого при компенсации активных помех в спектральной области, приводит к значительному повышению эф-

фективности адаптивной компенсации помех в условиях их многопутевого распространения (отношение сигнал/помеха улучшается более чем на 15 дБ при увеличении порядка БПФ в 32 раза).

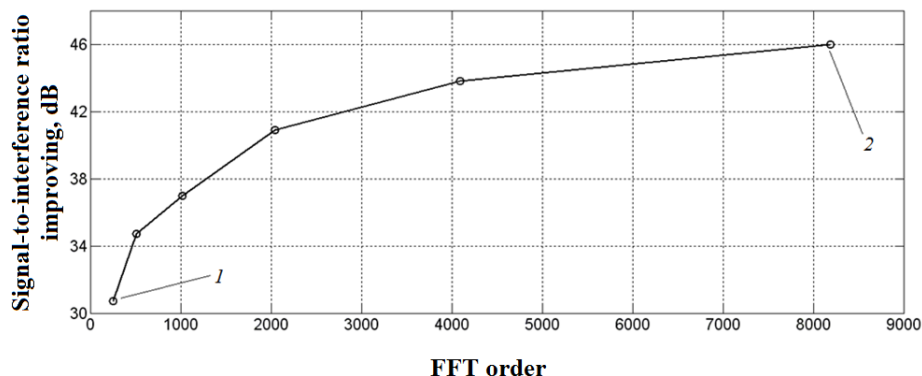


Рис. 1. Зависимость эффективности компенсации активной помехи от порядка БПФ при наличии одного переотражения помехи, $\tau_2 = 2$ мкс, $\dot{K}_{a_2} = 0,2$. 1 — соответствует случаю использования метода адаптивной компенсации в приемных трактах ВРЛ; 2 — в приемном тракте РД.

Fig. 1. The dependence of the compensation effectiveness from the order of the FFT in the presence of one interference reflection, $\tau_2 = 2$ us, $\dot{K}_{a_2} = 0,2$. FFT - fast Fourier transform: 1 – corresponds to the case of using the adaptive compensation method in the receiving paths of SSR; 2 – in the receiving path of rangefinder repeater

При использовании метода адаптивной компенсации в приемном тракте ретранслятора дальномера посадочной радиомаячной группы обеспечивается значительно большая эффективность компенсации активных помех, чем при рассмотренном в [3, 4] использовании указанного метода в приемном тракте вторичного радиолокатора (за счет увеличения порядка БПФ).

Степень улучшения отношения сигнал/помеха при использовании указанного метода в приемном тракте ретранслятора дальномера практически ограничена лишь количеством вычислительных ресурсов, используемых при выполнении операции БПФ.

Список литературы

- 1 Сосновский А. А., Хаймович И. А. Радиотехнические средства ближней навигации и посадки летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1975. 200 с.
- 2 Беляевский Л. С., Новиков В. С., Олянюк П. В. Основы радионавигации. М. : Транспорт, 1982. 288 с.

- 3 Фридман Л. Б., Николаев С. Ф., Мазаян Н. А., Синицын Е. А., Шильдкрет А. Б., Чепель Е. В. Алгоритмы и устройства адаптивного подавления телевизионных помех для вторичных радиолокационных станций УВД. СПб. : Облик, 2010. 190 с.
- 4 Фридман Л. Б., Зубков В. А., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Синицын Е. А., Шильдкрет А. Б. Пат. 103008 (РФ). Устройство адаптивной компенсации телевизионных помех. Оpubл. в Б. И., 2011. № 8.
- 5 Skolnik M. Radar handbook, 3rd ed. McGraw Hill, 2008. 1328 p.
- 6 Фридман Л. Б., Ершов Г. А., Мясников С. А., Синицын Е. А. Особенности построения новой посадочной радиомаячной группы для радиомаячной системы посадки воздушных судов. В кн. : 27-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2017 (Севастополь, 3—9 сент. 2017 г.). 2017. С. 1526—1530.
- 7 Фридман Л. Б., Ершов Г. А., Синицын В. А., Синицын Е. А. Посадочная радиомаячная группа отечественного и международного диапазонов частот В кн. : 10-я Общеросс. Научно-практическая конф. «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», том 1. (Санкт-Петербург, 2017 г.). 2017. С. 314—317.
- 8 Фридман Л. Б., Николаев С. Ф., Чепель Е. В., Шильдкрет А. Б. Обеспечение электромагнитной совместимости средств телевидения с наземными и бортовыми средствами вторичной радиолокации // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2008. Вып. 2. С. 51—61.

Информация об авторах

Фридман Леонид Борисович, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Синицын Евгений Александрович, Главный конструктор по системам радиолокации Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Ершов Герман Анатольевич, Заместитель генерального конструктора — начальник управления проектами Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Leonid B. Fridman, senior scientific researcher of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, S-Petersburg, Russian Federation.

Eugeniy A. Sinitin, chief designer of radar systems of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, S-Petersburg, Russian Federation.

German A. Ershov, deputy general designer - head of project management of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, S-Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.372.8

Синтез компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой¹

Крутиев С. В., Земляков В. В., Клещенков А. Б.
*Физический факультет, Южный федеральный университет
ул. Зорге, 5, Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация
sergey-kryt@yandex.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В данной работе решена задача синтеза компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами измерений АЧХ изготовленных фильтров-прототипов. Подтверждена высокая точность и эффективность предлагаемых методики.

Ключевые слова: СВЧ фильтр, прямоугольный волновод, тонкая металлическая диафрагма, резонансные диафрагмы.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Крутиев С. В., Земляков В. В., Клещенков А. Б. Синтез компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 145—153.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Крутиев, С. В. Синтез компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой / С. В. Крутиев, В. В. Земляков, А. Б. Клещенков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 145—153.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Synthesis of compact waveguide filters with an elliptic characteristic

S. V. Krutiev, V. V. Zemlyakov, and A. B. Kleshenkov

*Faculty of Physics, Southern Federal University
5, Zorge street, 344090, Rostov-on-Don, Russia
sergey-kryt@yandex.ru*

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *In this paper, the problem of the synthesis of compact waveguide filters with an elliptic characteristic is solved. The results of computer simulation are compared with the results of frequency response measurements of the manufactured prototype filters. The high accuracy and efficiency of the proposed methodology was confirmed.*

Keywords: *Microwave filter, rectangular waveguide, thin metal diaphragm, resonant diaphragms.*

For citation (IEEE): S. V. Krutiev et al. “Synthesis of compact waveguide filters with an elliptic characteristic,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 145–153, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.13

1. Введение

Волноводные СВЧ-фильтры находят широкое применение в современных системах локации, навигации и связи, особенно в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, благодаря малым потерям и большой передаваемой мощности [1—2]. Основным недостатком волноводных фильтров являются их значительные габаритные размеры и вес. Для решения данной проблемы можно использовать переход от классических объемных резонаторов к плоско-поперечным резонаторам, реализованным чаще всего с помощью тонких металлических резонансных диафрагм [12—17].

При практической реализации тонкие плоско-поперечные металлические диафрагмы могут изготавливаться либо непосредственной фрезеровкой металлических пластин конечной толщины, составляющей обычно 1—2 мм для обеспечения необходимой прочности, либо путем нанесения металлизации на поверхность тонких диэлектрических пластин с малой диэлектрической проницаемостью [3—4]. Металлизация диэлектрика позволяет не только добиться более высокой точности изготовления сложной

апертуры, но и дополнительного уменьшения размеров проектируемых частотно-селективных устройств. Более того, благодаря замене стандартных волноводных инверторов в виде четвертьволновых связей более короткими участками сложной конфигурации можно построить цельную слоистую металлодиэлектрическую конструкцию фильтра, которая будет легко интегрироваться в волноводную линию и заменяться при необходимости.

Резонансные диафрагмы со сложной апертурой должны описываться более сложными эквивалентными схемами, чем стандартные прямоугольные окна. Корректное построение эквивалентной схемы сложной диафрагмы позволяет эффективно использовать хорошо известные инструменты схемотехнического синтеза для расчетов характеристик фильтров прототипов, причем не только фильтров Чебышева или Баттерворта, но и эллиптические фильтры с полюсами затухания в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) [5].

Поэтому, развитие численно-аналитических методов электродинамического анализа сложных волноводных резонансных диафрагм и алгоритмов синтеза компактных полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров на их основе является актуальной задачей для развития инфокоммуникационных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

2. Постановка задачи

В данной работе решена задача синтеза компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой. Амплитудно-частотная характеристика эллиптического фильтра-прототипа низких частот является функцией круговой частоты ω и задается следующим выражением [6-10].

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\xi, \omega/\omega_0)}}, \quad (1)$$

где R_n — рациональная эллиптическая функция n -го порядка, ω_0 — частота среза, ε — показатель пульсаций, ξ — показатель селективности.

Значение показателя пульсаций ε определяет пульсации в полосе пропускания, пульсации же в полосе подавления зависят как от показателя пульсаций, так и от показателя селективности ξ .

Рассчитаем эквивалентную электрическую схему эллиптического фильтра третьего порядка с полосой пропускания 7.5% и уровнем затухания в полосе пропускания –20 дБ (рис. 1а). Перейдем из ступенчатой схемы к схеме последовательно-параллельных колебательных контуров, включенных параллельно в длинную линию (рис. 1б). При этом в послед-

нем варианте в схему необходимо включить инверторы сопротивлений К, роль которых для волноводного фильтра могут сыграть четвертьволновые отрезки волновода.

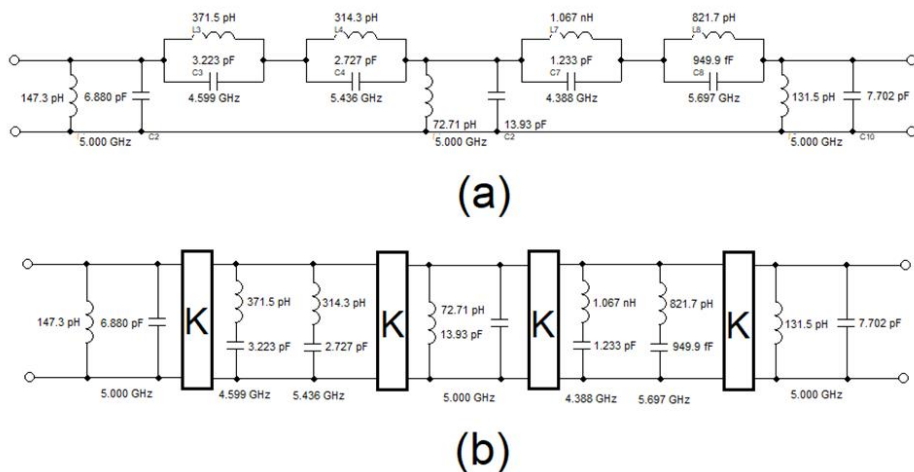


Рис. 1. Эквивалентная схема эллиптического фильтра.

Fig. 1. Equivalent elliptical filter circuit

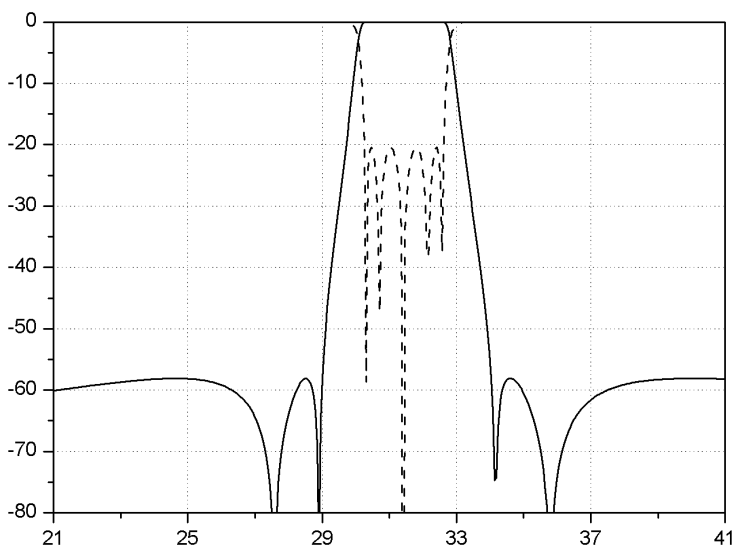


Рис. 2. АЧХ эллиптического фильтра-прототипа.

Fig. 2. The frequency response of the elliptical filter prototype

Амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра приведена на рис. 2 ($|S_{21}|$ — сплошная линия, $|S_{11}|$ — пунктирная линия) до преобразования частот с учетом модовой дисперсии волновода.

3. Расчет параметров одиночных диафрагм

Повторяя алгоритм [6, 10], проведем расчет параметров одиночных диафрагм фильтра. На рис. 3—5 приведены зависимости модулей S-параметров от частоты для пропускающих и заграждающих резонаторов в сравнении с результатами измерений (маркеры).

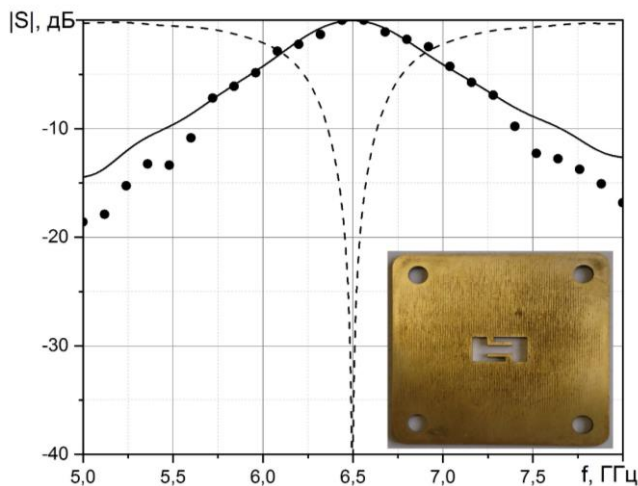


Рис. 3. Зависимость $|S|$ -параметров от частоты для первой резонансной диафрагмы.

Fig. 3. Frequency dependence of $|S|$ parameters for the first resonant diaphragm

Геометрические размеры синтезированных диафрагм для полосно-пропускающего фильтра приведены в таблице 1, где l — расстояние между диафрагмами фильтра после оптимизации.

Таблица 1. Размеры волноводного пятирезонаторного фильтра

Table 1. Dimensions of a waveguide five-cavity filter

Номер диафрагмы	a'_i , мм	b'_i , мм	p_i , мм	h_i , мм	t_i , мм	d_i , мм	l_1 , мм	l_2 , мм
$i=1,5$	15.65	8.4	1	1.66	4.95	1.75	12.33	14.63
$i=2,4$	22.78	13.1	1 1	2.2 1.9	6.49 2	2.2 5.19		
$i=3$	13.73	7	1	1.36	3.64	1.75		

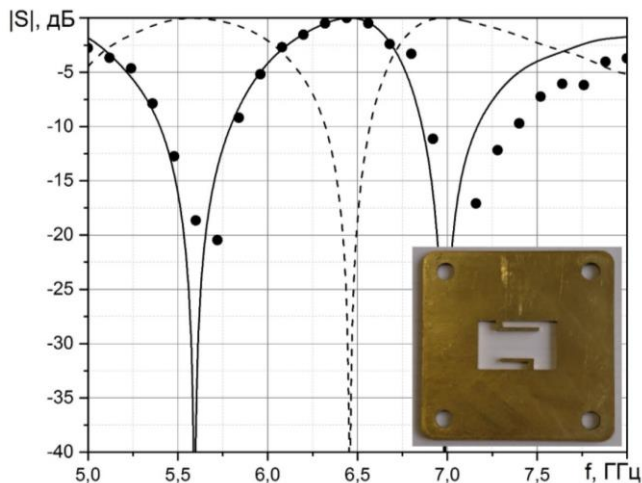


Рис. 4. Зависимость $|S|$ -параметров от частоты для второй резонансной диафрагмы
Fig. 4. Frequency dependence of $|S|$ parameters for the second resonant diaphragm

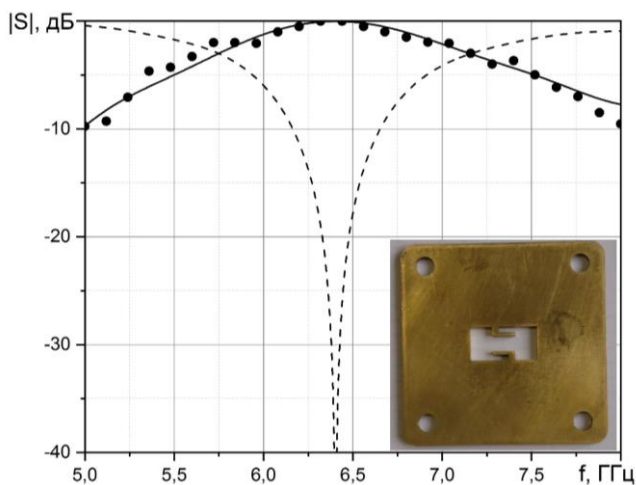


Рис. 5. Зависимость S -параметров от частоты для третьей резонансной диафрагмы.
Fig. 5. Frequency dependence of S -parameters for the third resonant diaphragm

4. Результаты расчетов

Амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра представлена на рис. 6 совместно с результатами измерений экспериментальных образцов. Как видно из рисунка, полученная АЧХ хорошо согласуется с характеристикой построенной эквивалентной схемы. Продольный

размер фильтра составил всего 64 мм, что соответствует 1.35 рабочей длины волны. Полоса пропускания по уровню -3 дБ составила 6.22—6.82 ГГц или 9.2 %, а коэффициент прямоугольности по уровням -3 и -20 дБ составил 0.8. Уровень затухания в полосе заграждения фильтра заметно увеличился по сравнению с фильтром третьего порядка и составил более 30 дБ. Все элементы синтезированного фильтра приведены на рис. 7 и 8.

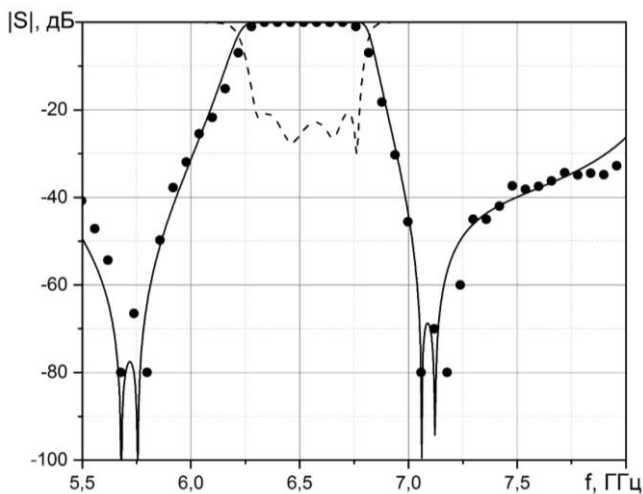


Рис. 6. АЧХ волноводного пятирезонаторного фильтра в сравнении с результатами эксперимента.

Fig. 6. Frequency response of a five-cavity filter waveguide in comparison with experimental results

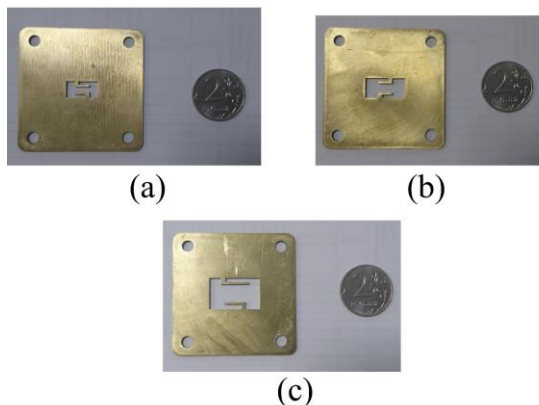


Рис. 7. Резонансные диафрагмы волноводного пятирезонаторного эллиптического фильтра.

Fig. 7. Resonant diaphragms of a waveguide five-cavity elliptical filter



Рис. 8. Элементы волноводного пятирезонаторного эллиптического фильтра на сложных диафрагмах.

Fig. 8. Elements of a waveguide five-cavity elliptical filter on complex diaphragms

5. Заключение

Таким образом, удастся полностью обеспечить практическую реализацию радиотехнической схемы эллиптического фильтра на базе таких резонаторов. Более того, благодаря размещению пары последовательных колебательных контуров в рамках одной диафрагмы, дополнительно уменьшен продольный размер фильтра, за счет исключения согласующих волноводных участков инверторов сопротивлений. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами измерений АЧХ изготовленных фильтров-прототипов. Подтверждена высокая точность и эффективность предлагаемых методик.

Список литературы

1. Маттей Д., Янг Л., Джонс К. М. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: в 2 т. Т. 1—2. М. : Связь, 1972. 495 с.
2. Zhu L., Mansour R. R., M. Yu, Compact Waveguide Dual-Band Filters and Diplexers // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 2017. №. 65(5). С. 1525—1533.
3. Ding J. Q., Shi S. C., Zhou K., Zhao Y., Liu D., Wu W. WR-3 Band Quasi-Elliptical Waveguide Filters Using Higher Order Mode Resonances // IEEE Trans. Terahertz Science and Technology. 2017. № 7(3). С. 302—309.

4. Kirilenko A. A., Rud L. A., Senkevich S. Spectral Approach to the Synthesis of Bandstop Filters // IEEE Trans. Microwave Theory and Technique. 1994. № 42(7). С. 1387—1392.
5. Stefanovski S., Potrebi M., Toši D. A novel design of E-plane bandstop waveguide filter using quarter-wave resonators // Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications, 2015. Т. 9, № 1—2. С. 87—93.
6. Zemlyako V., Krutiev S., Tyaglov M., Shevchenko V. A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2019. № 47. С. 55—64.
7. Крутиев С. В., Земляков В. В., Заргано Г. Ф., Волноводный полосно-пропускающий фильтр на сложных резонансных диафрагмах // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 12. С. 1231.
8. Zemlyakov V. V., Krutiev S. V., Kleshchenkov A. B. The compact waveguide filters with complex aperture resonant diaphragms // Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2016, 8—11 August, Shanghai, China. С. 3224—3228.
9. Заргано Г. Ф., Земляков В. В., Крутиев С. В., Клещенко А. Б. Волноводный квазиэллиптический фильтр на сложных резонансных диафрагмах // Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8, № 1. С. 47—54.
10. Земляков В. В., Заргано Г. Ф., Крутиев С. В., Тяглов М. Ю. Электродинамический анализ и синтез эллиптического фильтра на сложных резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 12. С. 1130—1139.

Информация об авторах

Крутиев Сергей Владимирович, преподаватель физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-9389-8344.

Земляков Вячеслав Викторович, профессор физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-3932-6759.

Клещенко Анатолий Борисович, доцент физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-4238-9504.

Information about the authors

Sergey V. Krutiev, lecturer of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0002-9389-8344

Vyacheslav V. Zemlyakov, professor of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0002-3932-6759.

Anatoly B. Kleschenkov, associate professor of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0003-4238-9504.

УДК 621.372.8

Электродинамический анализ круглых волноводов со сложными металлическими гребнями и диэлектрическим заполнением¹

Лонкина Д. В., Земляков В. В., Губский Д. С.
Физический факультет, Южный федеральный университет
ул. Зорге, 5, Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация
lonkina.daria@yandex.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Решена задача электродинамического анализа модового состава излучения в круглом волноводе со сложными металлическими ребрами и диэлектрическим заполнением. Разработаны алгоритмы расчета критических волновых чисел, постоянных распространения и компонент электромагнитных полей Н- и Е-волн с учетом особенности поведения поля вблизи сложного металлического ребра.

Ключевые слова: круглый волновод, радиальные металлические гребни, кусочно-слоистое заполнение, сложный контур, плоско-поперечная неоднородность, электродинамический анализ.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Лонкина Д. В., Земляков В. В., Губский Д. С. Электродинамический анализ круглых волноводов со сложными металлическими гребнями и диэлектрическим заполнением // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 154—164.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Лонкина, Д. В. Электродинамический анализ круглых волноводов со сложными металлическими гребнями и диэлектрическим заполнением / Д. В. Лонкина, В. В. Земляков, Д. С. Губский // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 154—164.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо-2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Electrodynamic analysis of circular waveguide with complex metal ridges and dielectric filling

D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, and D. S. Gubsky

*Faculty of Physics, Southern Federal University
Zorge street, 5, 344090, Rostov-on-Don, Russia
lonkina.daria@yandex.ru*

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *The problem of electrodynamic analysis of the mode composition of radiation in a circular waveguide with complex metal ridges and dielectric filling is solved. Algorithms have been developed for calculating critical wave numbers, propagation constants, and components of the electromagnetic fields of TM and TE waves, taking into account the specific behavior of the field near a complex metal edge.*

Keywords: *circular waveguide, radial metal ridges, dielectric filling, complex contour, plane-transverse inhomogeneity, electrodynamic analysis.*

1. Введение

Гребневые волноводы находят широкое применение в современной СВЧ технике. Обычно гребневый волновод состоит из прямоугольного или круглого волновода с одной или несколькими продольными металлическими вставками (гребнями). Основным преимуществом данного вида волноводов является широкий диапазон частот одномодового режима работы, возможность создавать на их базе частотно-селективные устройства, а для волноводов круглого сечения – возможность управления поляризацией. Гребневые волноводы используются в приемных и передающих антеннах, в поляризаторах, полосовых фильтрах [1—8]. Благодаря широкой рабочей полосе частот, малым потерям и достаточно высокой передаваемой мощности гребневые волноводы успешно используются для построения направленных ответвителей, создавая достойную конкуренцию полосковым линиям передачи [9]. Наиболее универсальным подходом при синтезе СВЧ устройств на базе гребневых волноводов, в том числе и с диэлектрическим заполнением, является применение прямых численных методов, таких как метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечного интегрирования, а также их комбинации с вариационны-

ми методами и методами интегральных уравнений [11—13]. Основным недостатком применения данных методов являются высокие требования к вычислительным ресурсам, а также значительное время расчетов. Более того, при отсутствии хорошего начального приближения многие алгоритмы оптимизации вообще не приводят к желаемому результату.

Для электродинамического анализа гребневых волноводов используются различные методы. Количество работ, посвященных электродинамическому анализу круглых волноводов со сложными металлическими ребрами и неоднородным диэлектрическим заполнением, невелико. При этом большинство авторов приводят расчеты только критических волновых чисел для достаточно ограниченного числа волн и геометрических размеров волноводов. Кроме того практически отсутствует расчет и визуализация полей Н- и Е-волн. Для систематизации данного класса волноводов необходимо разработать метод, который будет универсальным, с помощью которого можно рассматривать как волноводы с тонкими металлическими ребрами, так и волноводы со сложными радиальными ребрами. Тогда, задавая различные значения определенных параметров, можно проводить анализ для разных конфигураций волноводов. Поэтому разработка программ электродинамического анализа является актуальной задачей.

2. Постановка задачи

В данной работе приведено решение задачи электродинамического анализа критических волновых чисел и компонент электромагнитных полей Н-волн круглого волновода с тонкими радиальными металлическими ребрами и диэлектрическим заполнением. Для повышения точности и скорости вычислений в разработанных алгоритмах реализован учет особенности поведения поля вблизи тонкого металлического ребра.

Рассмотрим постановку задачи и запись компонент поля квази Н-волн в случае конфигурации волновода, которая представлена на рис.1 (рис.1). Для данного типа конфигурации (рис. 1) круглого волновода с плоскими бесконечно тонкими ребрами и диэлектрическим заполнением постановка задачи ставится таким образом, что разбиение будем производить согласно следующим условиям: $r \in [0, r_1]$ — первая частичная область; $r \in [r_1, r_2]$ — вторая частичная область (рис. 2).

Для решения поставленной задачи будем использовать метод частичных областей с учетом особенности поведения поля вблизи металлического ребра. Исходя из соображения симметрии, будем рассматривать только четвертую часть поперечного сечения с различными граничными условиями на внешнем контуре, которая показана на рис. 2.

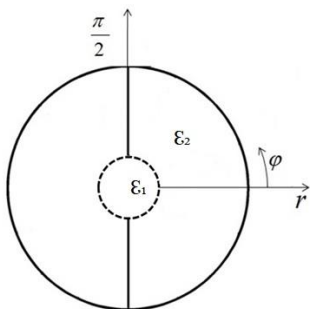


Рис. 1. Структура круглого волновода с металлическими ребрами.

Fig. 1. The structure of a circular waveguide with metal ribs

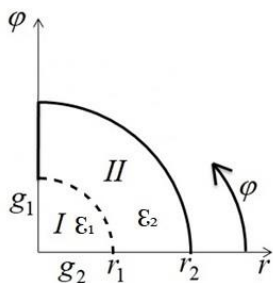


Рис. 2. Разбиение сложной области круглого волновода с металлическими ребрами.

Fig. 2. Partitioning a complex region of a circular waveguide with metal ribs.

3. Запись компонент поля квази Н-волн

В качестве примера приведем алгоритм расчета для z-компоненты поля квази Н-волн. Компоненты полей в частичных областях будем представлять в виде рядов с неопределенными коэффициентами по собственным функциям частичных областей. Тогда компоненты поля в двух частичных областях с учетом граничных условий будут иметь следующий вид:

$$H_z^1 = \sum_{m=0}^{\infty} A_m^1 \cos \left[(2m+1-g)\varphi - \frac{\pi}{2}g \right] J_{\nu_1}(\beta_1 r) \quad (1)$$

$$H_z^2 = \sum_{m=0}^{\infty} A_m^2 \cos \left[(2m+g)\varphi - \frac{\pi}{2}g \right] [J_{\nu_2}(\beta_2 r) - P_m N_{\nu_2}(\beta_2 r)] \quad (2)$$

где A_m^1, A_m^2 — это неизвестные коэффициенты, где $J_{\nu_1}(\beta_1 r), J_{\nu_2}(\beta_2 r)$ — функции Бесселя первого рода; $N_{\nu_2}(\beta_2 r)$ — функция Бесселя второго рода, а P_m определим как:

$$P_m = -J'_{2m+g}(\beta r_2) / N'_{2m+g}(\beta r_2), \quad (3)$$

где штрих обозначает производную по аргументу.

На границе раздела двух частичных областей введем неизвестные функции $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$, которые определим следующим образом:

$$E_\varphi|_{r=r_1} = -j f_1(\varphi) \quad (4)$$

$$E_z|_{r=r_1} = f_2(\varphi) \quad (5)$$

где неизвестные функции $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$ будем искать в виде:

$$f_i(\varphi) = (1 - (2\varphi/\pi)^2)^{(1/2)-2+i} \sum_{i=0}^{\infty} C_i T_{2i+g}(2\varphi/\pi) \quad (6)$$

где C_i — неизвестные коэффициенты разложения, а $T_{2i+g}(x)$ — полиномы Чебышева, которые образуют системы полные и ортогональные функций с весовыми множителями, учитывающими особенность поведения поля вблизи ребра.

Тогда неизвестные коэффициенты A_m^1, A_m^2 в разложениях можно определить через функции $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$, которые заданы на разделе частичных областей:

$$\begin{aligned} A_m^1 &= (J_{\nu_1}(\beta_1 r_1))'^{-1} \int_0^{\pi/2} f_1(\varphi) \cos\left[\nu_1 \varphi - \frac{\pi}{2} g\right] d\varphi = \\ &= (J_{\nu_1}(\beta_1 r_1))'^{-1} \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \frac{\pi^2}{4} J_{2i+g}\left(\frac{\pi}{2} \nu_1\right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A_m^2 &= (\mu_m (J_{\nu_2}(\beta_2 r_1) - P_m N_{\nu_2}(\beta_2 r_1)))'^{-1} \int_0^{\pi/2} f_2(\varphi) \cos\left[\nu_2 \varphi - \frac{\pi}{2} g\right] d\varphi = \\ &= (\mu_m (J_{\nu_2}(\beta_2 r_1) - P_m N_{\nu_2}(\beta_2 r_1)))' * J_{\nu_1}(\beta_1 r_1))'^{-1} \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \frac{\pi^2}{4} J_{2i+g}\left(\frac{\pi}{2} \nu_2\right) \end{aligned} \quad (8)$$

В результате, выполняя необходимые преобразования, мы получаем систему уравнений вида:

$$\sum_{i=0}^N C_i D_{ij}^h(\beta_q k) = 0 \quad (9)$$

Для нахождения нормированных критических волновых чисел полагаем постоянную распространения равной нулю. В результате получаем систему уравнений:

$$\sum_{i=0}^N C_i D_{ij}^h(\sqrt{\varepsilon_q} k) = 0 \quad (10)$$

Приравнивая определитель данной системы к нулю, получаем уравнение для нахождения критических волновых чисел. Для визуализации полей подставляем значение критических волновых чисел в формулы (1) и (2). Каждому полученному значению постоянной z -компоненты соответствует своя силовая линия. Задавая в (11) последовательность значений, получаем семейство силовых линий:

$$H_z(r, \varphi) = \text{const} \quad (11)$$

4. Результаты расчетов

В качестве примера расчета по созданному алгоритму рассмотрим структуру со следующими параметрами: $r_1 = 0.35; r_2 = 1.00; \varepsilon_1 = 6.0, \varepsilon_2 = 1.0$. В таблице 1 представлены критические волновые числа, рассчитанные с помощью созданного алгоритма, где M — количество членов в ряду, N — число аппроксимирующих функций.

Таблица 1. Таблица сходимости рассчитанных критических волновых чисел.

Table 1. Convergence table of calculated critical wave numbers

N	M				
	10	30	50	80	100
1	0.8849	0.8532	0.8443	0.8382	0.8358
	2.9965	2.9869	2.9842	2.9824	2.9816
	3.9072	3.8911	3.8864	3.8831	3.8818
	5.5049	5.5029	5.5009	5.5006	5.4990
2	0.8988	0.8573	0.8467	0.8397	0.8370
	2.9966	2.9874	2.9852	2.9837	2.9832
	3.9592	3.9551	3.9541	3.9534	3.9531
	5.5141	5.4899	5.4829	5.4779	5.4760
3	0.9133	0.8616	0.8491	0.8411	0.8381
	3.0015	2.9892	2.9863	2.9845	2.9839
	3.9609	3.9556	3.9543	3.9535	3.9532
	5.5162	5.4900	5.4834	5.4792	5.4776
4	0.9267	0.8662	0.8517	0.8426	0.8393
	3.0049	2.9903	2.9870	2.9849	2.9841
	3.9622	3.9560	3.9545	3.9536	3.9533
	5.5237	5.4928	5.4851	5.4802	5.4783

N	M				
	10	30	50	80	100
5	0.9368	0.8710	0.8545	0.8442	0.8406
	3.0074	2.9914	2.9876	2.9853	2.9844
	3.9633	3.9564	3.9548	3.9538	3.9534
	5.5289	5.4953	5.4865	5.4810	5.4790

Из данной таблицы можно видеть достаточно быструю монотонную сходимость.

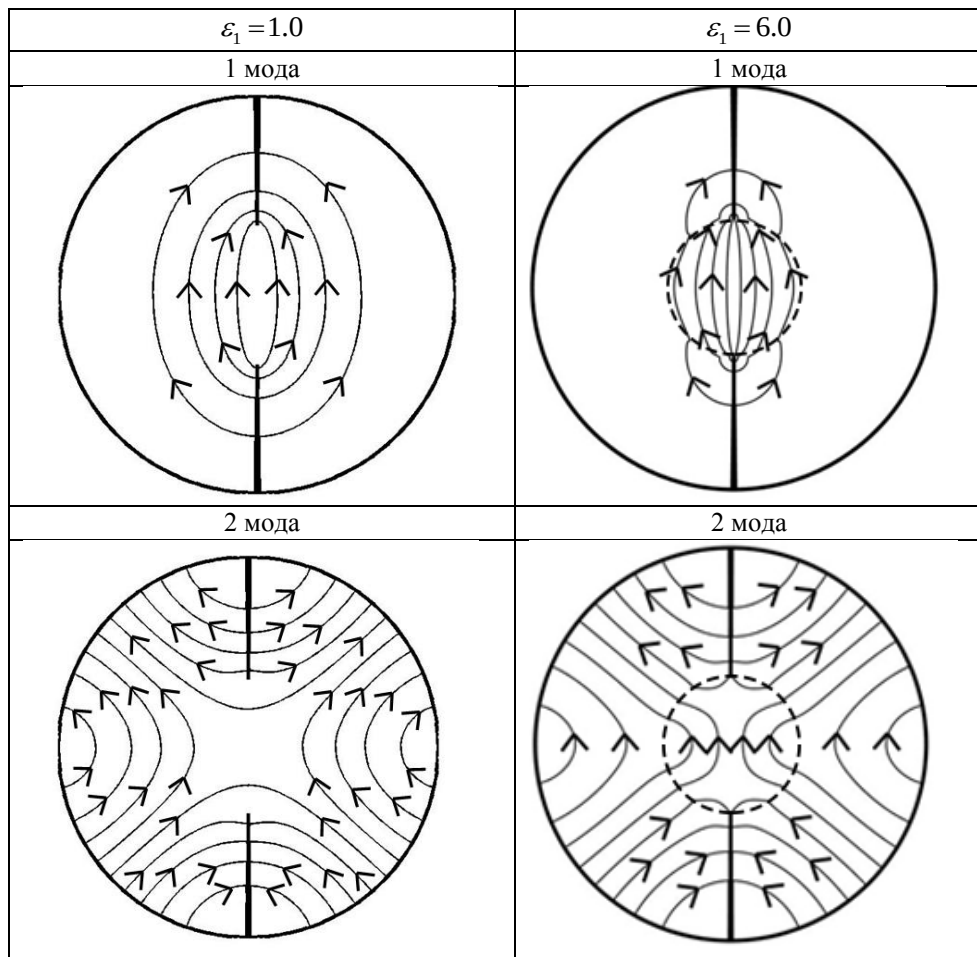


Рис. 3. Картины силовых линий для 1 и 2 мод при разных значениях диэлектрической проницаемости.

Fig. 3. Field line patterns for modes 1 and 2 at different permittivity values

Результаты визуализации полей представлены на рис. 3 и рис. 4. В случае квази Н-волн основная часть силовых линий первой моды расположена в пространстве между ребрами, а у второй моды линии распределены по всему поперечному сечению волновода. У третьей моды силовые линии находятся в основном в пространстве между неоднородностями. Силовые линии четвертой моды сосредоточены за пределами области конечных ребер.

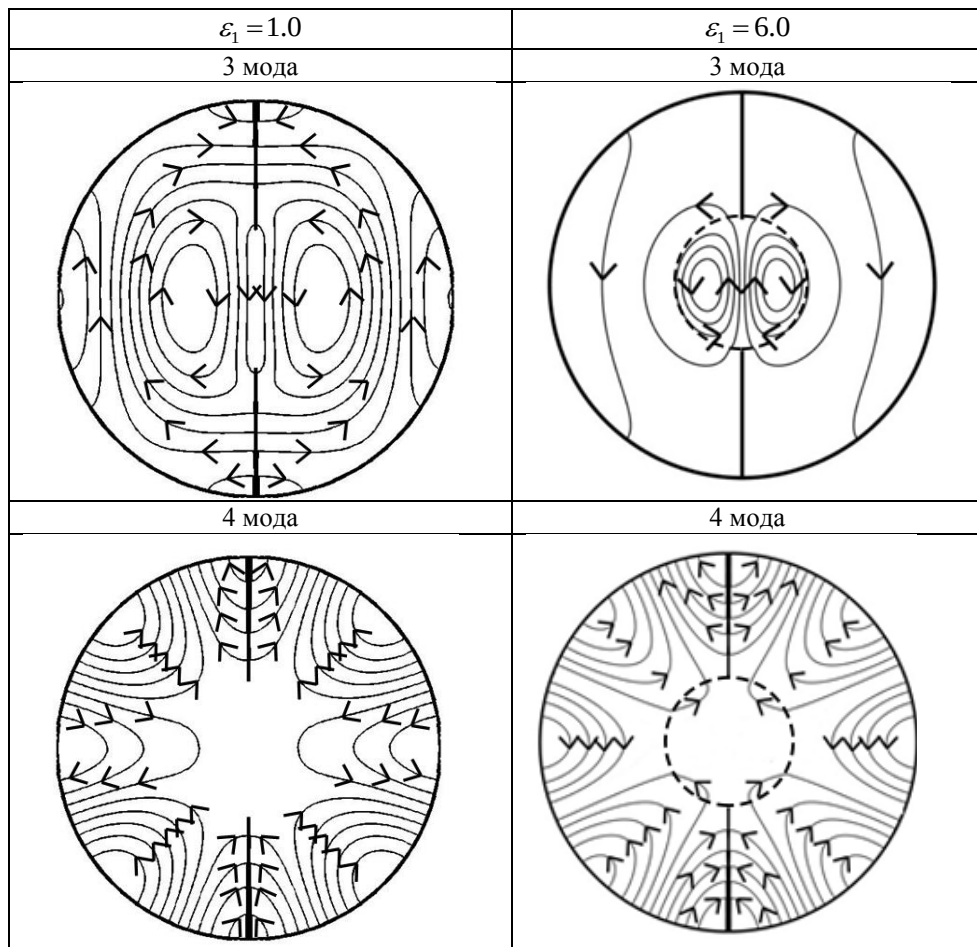


Рис. 4. Картины силовых линий для 3 и 4 мод при разных значениях диэлектрической проницаемости.

Fig. 4. Field line patterns for 3 and 4 modes at different values of permittivity

Для данной структуры были проведены исследования на зависимость критических волновых чисел от различного значения диэлектрической проницаемости, а именно для структуры со следующими параметрами: $r_1 = 0.35$; $r_2 = 1.00$; $\varepsilon_2 = 1.0$. На рис. 5 приведены полученные результаты.

Так как поле третьей моды сосредоточено в пространстве между неоднородностями, то изменение диэлектрической проницаемости наиболее сильно влияет на критическое волновое число именно третьей моды. Тогда как критическое волновое число второй моды остается практически без изменения.

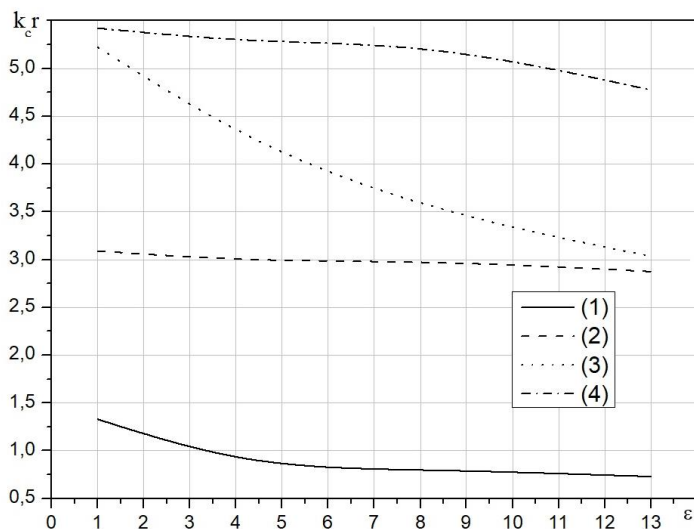


Рис. 5. Зависимость критических волновых чисел от диэлектрической проницаемости.

Fig. 5. The dependence of the critical wave numbers on the dielectric constant.

5. Заключение

Таким образом, представленные результаты подтверждают, что разработанная методика электродинамического анализа круглых волноводов со сложными металлическими ребрами и неоднородным диэлектрическим заполнением является эффективной. В результате исследования получен высокоскоростной алгоритм, с помощью которого можно производить расчет критических волновых чисел и компонент электромагнитных полей волновода, а также строить визуализацию силовых линий электромагнитного поля.

Из приведенных результатов видно, что разработанный метод обеспечивает достаточную непрерывность компонент поля на границе раздела частичных областей. Представленная визуализация подтверждает точность и эффективность предложенных алгоритмов и позволяет анализировать влияние металлических ребер и диэлектрического заполнения на распределение электромагнитного поля в поперечном сечении волновода. Приведенные результаты позволяют оценить основные эффекты, связанные с наличием тонкого продольного металлического гребня и диэлектрического заполнения в круглом волноводе. Так, визуализация электромагнитного поля в поперечном сечении дает представления об искажении линий напряженности и позволяет определить области наибольшей плотности электромагнитного поля.

Список литературы

1. Rong Y., Zaki K. A. "Characteristics of Generalized Rectangular and Circular Ridge Waveguides" // IEEE Trans. MTT. 2000. T. 48, № 2. С. 258—265.
2. Amari S., Catreux S., Vahldieck R., Bornemann J. "Analysis of Ridged Circular Waveguides by the Coupled-Integral-Equations Technique" // IEEE Trans. MTT. 1998. T. 46, № 5. С. 479—493.
3. Bornemann J., Amari S., Uher J., Vahldieck R. "Analysis and Design of Circular Ridged Waveguide Components" // IEEE Trans. MTT. 1999. T. 47, № 3. С. 330—335.
4. Gubskii D. S., Lyapin V. P., Sinyavskii G. P. "Electrodynamic calculation of the parameters of a diaphragmed junction between round waveguides" // Radio Engineering and Electronic Physics (English translation of Radiotekhnika i Elektronika). 1984, T. 29, № 1. С. 12—19.
5. Gubsky D. S., Zemlyakov V. V., Lonkina D.V. "Electrodynamic Analysis of a Circular Waveguide with Thin Metal Ribs" // Radiophysics and Quantum Electronics. 2018. T. 61. № 5. С. 362—373.
6. Gubsky D.S., Sinyavsky G.P. "The development of circular waveguide structures for microwave devices taking into account the electromagnetic field singularity" // Physical Bases of Instrumentation. 2012. T. 1, № 1. С. 51—75.
7. Seng Yong Yu, Jens Bornemann "Evanescent-mode filters with arbitrary positioned ridges in circular waveguide" // Proceedings of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. 2011. С. 504—508.
8. Chong Zhang, Junhong Wang, Meie Chen, Zhan Zhang "A new kind of leaky circular waveguide with periodic slots and wire ridge" // Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-R 14.
9. Ma C., Wang J., "Design of wide band directional coupler by ridged rectangular waveguide for large power capability", 2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies, MAPE 2015. С. 587—590.
10. Handamirov V. L., Sergeev D. A. "The Study of Multi-Element Waveguide Feed", Science and Education of Bauman MSTU. 2016. № 5. С. 66—81.
11. Mittra R., Lee S. W., Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves, Macmillan, New York. 1971.
12. Zargano G. F., Lyapin V. P., Mikhalevsky V. S., et al. Waveguides of Complex Cross Sections [in Russian]. M. : Radio i Svyaz', 1986.
13. Zargano G. F., Zemlyakov V. V., Krivopustenko V. V. // Electrodynamic modeling of electromagnetic field in a rectangular waveguide with two L ridges // Journal of Electromagnetic Waves and Electronic Systems. 2008. T. 13, № 5. С. 54—59.

Информация об авторах

Лонкина Дарья Владимировна, аспирант физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID0000-0002-1208-0138.

Земляков Вячеслав Викторович, профессор физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID0000-0002-3932-6759.

Губский Дмитрий Семенович, доцент физического факультета Южного Федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID0000-0001-6651-5953.

Information about the authors

Daria V. Lonkina, postgraduate student of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0002-1208-0138.

Vyacheslav V. Zemlyakov, professor of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0002-3932-6759.

Dmitry S. Gubsky, associate professor of physics faculty at Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. ORCID 0000-0001-6651-5953.

УДК 621.396.62

Эффективность компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов при использовании сложных радиолокационных сигналов¹

Фридман Л. Б., Синицын Е. А., Ершов Г. А.

*Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт
радиоаппаратуры»
пр. Обуховской обороны, 120, Санкт-Петербург, 192012, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Проведен анализ эффективности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов. При этом рассмотрен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области, отличающийся тем, что позволяет компенсировать активные помехи (в частности, сигналы цифрового телевидения и сотовой связи) при их многопутевом распространении, вызванном наличием переотражений от местных предметов и подстилающей поверхности. Сформулированы особенности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов. Выполнена оценка влияния формата излучаемых сигналов (скважности зондирующих импульсов) на эффективность метода адаптивной компенсации. Выполнена сравнительная оценка эффективности компенсации активных помех в приемных трактах средств первичной и вторичной радиолокации. Проведен анализ влияния компенсации активных помех на характеристики эффективности обработки сложных радиолокационных сигналов, в частности, на уровень боковых лепестков на выходе фильтра сжатия.

Ключевые слова: первичный радиолокатор, активные помехи, адаптивная компенсация, скважность импульсных сигналов, уровень боковых лепестков.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Фридман Л. Б., Синицын Е. А., Ершов Г. А. Эффективность компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов при использовании сложных радиолокационных сигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 165—173.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Фридман, Л. Б. Эффективность компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов при использовании сложных радиолокационных сигналов / Л. Б. Фридман, Е. А. Синицын, Г. А. Ершов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 165—173.

Effectiveness of compensation of active interference in the receiving paths of primary radars at usage of wideband radar signals

L. B. Fridman, E. A. Sinitsin, and G. A. Ershov

Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”

120, Pr. Obukhovskoi Oborony, S-Petersburg, 192012, Russian Federation
lenya2002@bk.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *The effectiveness analysis of the adaptive method for active interference compensation in the receiving paths of primary radars is carried out. At that the method of adaptive compensation in the spectral domain is considered. The adaptive method allows to compensate active interference (particularly, digital television and cellular telecommunication) in its multipath propagation (caused by ground clutter). The features of using the adaptive method in the receiving paths of primary radars are formulated. The influence of the format of the transmitted signals (duty cycle of the transmitted signals) on the effectiveness of the adaptive compensation is estimated. A comparative evaluation of the effectiveness of active interference compensation in the receiving paths of primary and secondary radars is performed. The influence of active interference compensation on the effectiveness characteristics of wideband signals processing (in particular, on the sidelobe level at the compression filter output) is estimated.*

Keywords: *primary radars, phase-shift keyed signals, active interference, adaptive compensation, compression filter.*

For citation (IEEE): L. B. Fridman et al. "Effectiveness of compensation of active interference in the receiving paths of primary radars at usage of wideband radar signals," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 165–173, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.10

1. Введение

Широкое распространение новых радиоэлектронных средств (РЭС), работающих в частотном диапазоне первичных радиолокаторов, может уменьшить эффективность функционирования последних. В РФ и зарубежных странах частотный спектр 2500-2690 МГц занят широкополосной системой беспроводной связи LTE. В связи с этим система LTE влияет на работу обзорных радиолокаторов S-диапазона, подверженных влиянию активных помех в полосе частот 2500-2690 МГц [1]. Кроме того, дальнейшее интенсивное развитие новых РЭС приведет к необходимости решения новых проблем, связанных с обеспечением возможности их одновременного функционирования с первичными радиолокаторами.

В [2] был предложен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области. При этом в [2] рассматривалось использование указанного метода для компенсации помех во вторичных радиолокаторах (ВРЛ) управления воздушным движением. Первичные радиолокаторы отличаются от ВРЛ использованием длинных (до нескольких десятков микросекунд) зондирующих импульсов с внутриимпульсной модуляцией и последующей согласованной [3] или подоптимальной [4, 5] обработкой отраженных сигналов. С учетом указанных факторов, требуется выполнить анализ эффективности метода адаптивной компенсации активных помех при его использовании в приемном тракте первичных радиолокаторов.

2. Особенности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов

В [2] влиянием полезного сигнала на процесс компенсации непрерывной помехи пренебрегали ввиду малой длительности (и, как следствие, относительно малой средней мощности) полезного сигнала. В то же время, при компенсации помех в первичных радиолокаторах полезный сигнал может оказать значительное влияние на эффективность адаптивного метода по следующим причинам:

— первичные радиолокаторы отличаются тем, что в них используются длинные сложные сигналы с внутриимпульсной модуляцией [3] (фазоманипулированные сигналы и сигналы с частотной модуляцией). Поэтому длительность их импульсов может больше, чем у ВРЛ в несколько десятков раз;

— период повторения импульсов у первичных радиолокаторов может быть в несколько раз меньше, чем у ВРЛ в случае использования в первичных радиолокаторах формата сигналов с повышенной частотой повторения зондирующих импульсов и неоднозначностью по дальности [6, 7].

Кроме того, процесс компенсации активной помехи оказывает влияние также и на полезный сигнал. В связи с этим необходимо оценить степень влияния метода адаптивной компенсации на характеристики эффективности обработки сложных радиолокационных сигналов (в частности, на уровень боковых лепестков на выходе согласованного или подоптимального фильтра сжатия).

3. Влияние скажности полезного сигнала на эффективность метода адаптивной компенсации активных помех

Анализ эффективности адаптивной компенсации был проведен с помощью математического моделирования в программной среде “Matlab”. Активная помеха рассматривалась как стационарный шумоподобный комплексный гауссовский случайный процесс. В качестве критерия эффективности использован коэффициент улучшения отношения выходного B_U и входного B_S отношений сигнал/помеха

$$K_Y = B_U - B_S.$$

На рис. 1 показаны результаты выполненного анализа эффективности метода адаптивной компенсации при различных значениях скажности полезного сигнала и B_S . Как следует из рис. 1, при снижении скажности полезного сигнала эффективность метода адаптивной компенсации значительно ухудшается. В частности, при снижении скажности с 500 до 5 величина K_Y уменьшилась более чем на 20 дБ. Тем не менее, даже при низком уровне активной помехи ($B_S = 0$) и малой скажности полезного сигнала (≥ 5) величина K_Y составляет не менее 26 дБ, что свидетельствует о достаточно высокой потенциальной эффективности использования метода адаптивной компенсации в приемных трактах первичных радиолокаторов.

Следует отметить, что малые значения скважности (≤ 20) соответствуют случаю использования в первичном радиолокаторе формата сигналов с повышенной частотой повторения зондирующих импульсов и неоднозначностью по дальности [7, 8].

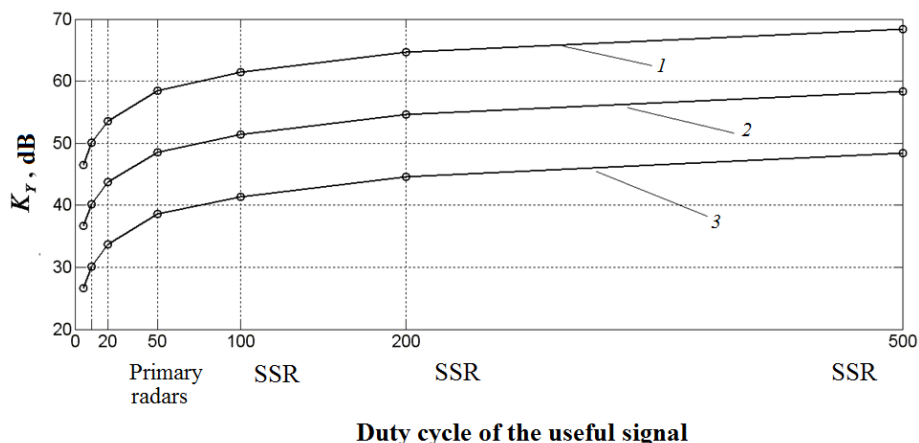


Рис. 1. Зависимость эффективности компенсации активной помехи от скважности полезного сигнала

1: $B_s = -20$ дБ; 2: $B_s = -10$ дБ; 3: $B_s = 0$ дБ.

Fig. 1. Dependence of effectiveness of the active interference compensation on the useful signal duty cycle (SSR – secondary surveillance radars)

1: $B_s = -20$ dB; 2: $B_s = -10$ dB; 3: $B_s = 0$ dB

4. Влияние компенсации активных помех на эффективность обработки сложных радиолокационных сигналов

Процесс компенсации активной помехи оказывает влияние на полезный сигнал [2]. В связи с этим была проведена оценка степени влияния метода адаптивной компенсации на эффективность обработки сложных радиолокационных сигналов. В качестве полезного сигнала рассматривался сигнал с фазовой манипуляцией (ФМ сигнал), выполненной в соответствии с 13-элементным кодом Баркера [9]. Скважность ФМ сигнала составляла 15. В качестве фильтров сжатия рассматривались согласованный фильтр, а также подоптимальный фильтр, отличающийся тем, что на его выходе отсутствуют боковые лепестки (с точностью до величины вычислительной погрешности) [4, 10]. Отношение сигнал/помеха на входе адаптивного компенсатора составляло минус 10 дБ (т. е. полезный сигнал был под шумами).

На рис. 2 показан выходной сигнал согласованного фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации. Как следует из рис. 2, некомпенсированные остатки активной помехи по уровню оказались значительно меньше, чем боковые лепестки полезного сигнала (благодаря компенсации). Следовательно, некомпенсированные остатки активной помехи практически не повлияли на разрешающую способность по дальности.

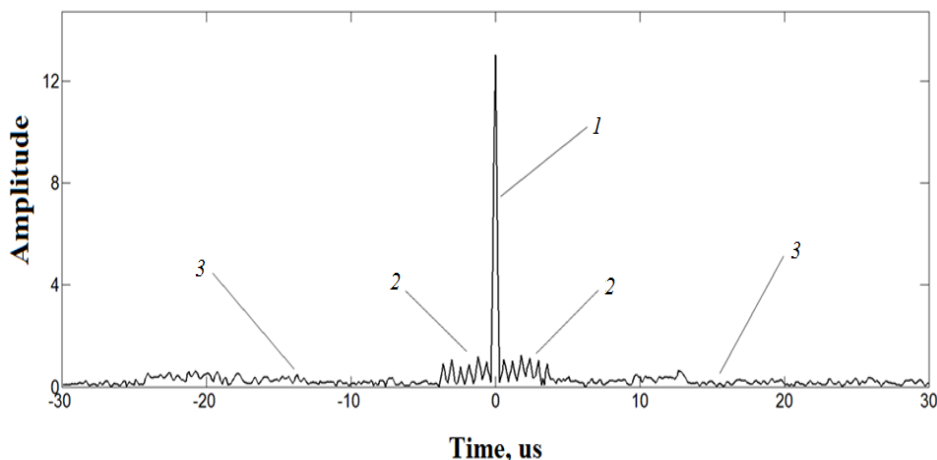


Рис. 2. Выходной сигнал согласованного фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации^Λ

1 — основной пик сжатого ФМ сигнала;

2 — боковые лепестки ФМ сигнала;

3 — некомпенсированные остатки активной помехи.

Fig. 2. The matched compression filter output when exposed to active interference and performing its compensation:

1 – main peak of the compressed phase-shift keyed signal;

2 – sidelobes of the compressed phase-shift keyed signal;

3 - uncompensated residues of active interference

На рис. 3 показан выходной сигнал подоптимального фильтра сжатия ФМ сигнала [4]. Указанный фильтр отличается тем, что на его выходе отсутствуют боковые лепестки. Из рис. 3 следует, что после выполнения компенсации на выходе подоптимального фильтра остались только основной пик полезного сигнала и некомпенсированные остатки активной помехи. Таким образом, уровень боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра определяется только уровнем компенсации активной помехи.

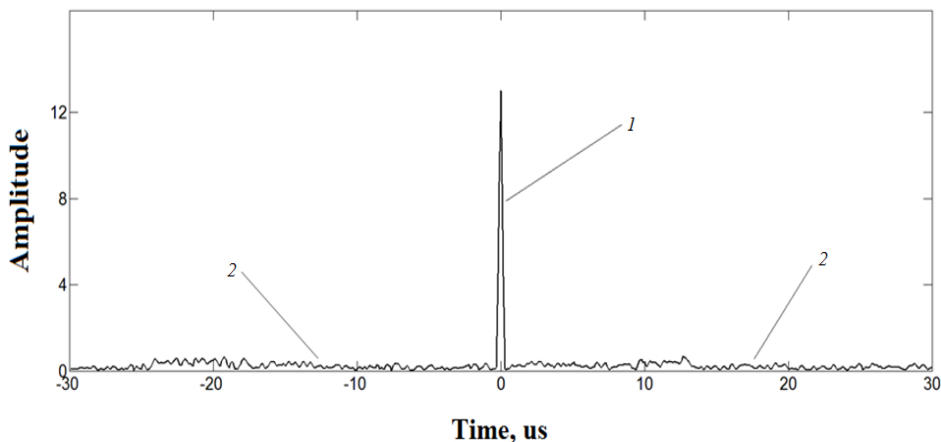


Рис. 3. Выходной сигнал подоптимального фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации:

- 1 — основной пик сжатого ФМ сигнала;
 2 — нескомпенсированные остатки активной помехи.

Fig. 3. The mismatched compression filter output when exposed to active interference and performing its compensation:

- 1 – main peak of the compressed phase-shift keyed signal;
 2 - uncompensated residues of active interference

5. Заключение

При использовании метода адаптивной компенсации активных помех в первичных радиолокаторах полезный сигнал может оказать значительное влияние на эффективность метода.

При снижении скважности полезного сигнала эффективность метода адаптивной компенсации значительно ухудшается (при снижении скважности с 500 до 5 отношение сигнал/помеха уменьшилось более чем на 20 дБ). Тем не менее, даже при низком уровне активной помехи (на уровне амплитуды полезного сигнала) и малой скважности полезного сигнала (≥ 5) улучшение отношения сигнал/помеха составляет не менее 26 дБ, что свидетельствует о достаточно высокой потенциальной эффективности использования метода адаптивной компенсации в приемных трактах первичных радиолокаторов.

При согласованном сжатии сигнала с фазовой манипуляцией, выполненной в соответствии с 13-элементным кодом Баркера, нескомпенсированные остатки активной помехи по уровню оказались значительно меньше, чем боковые лепестки полезного сигнала (благодаря компенса-

ции). Следовательно, некомпенсированные остатки активной помехи практически не повлияли на разрешающую способность по дальности.

Уровень боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра [4] определяется только уровнем компенсации активной помехи.

Список литературы

- 1 Versmissen H. Study of the performance degradation of the Belgian S-band air surveillance radars due to the interference of upcoming 4G technologies. Test Report, 2011. 55 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bipt.be/en/425/ShowDoc/3527/Communications/Study_of_the_Performance_Degradation_of_the_Belgia.aspx (дата обращения: 16.03.2019).
- 2 Фридман Л. Б., Зубков В. А., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Синицын Е. А., Шильдкрет А. Б. Пат. 103008 (РФ). Устройство адаптивной компенсации телевизионных помех. Оpubл. в Б. И., 2011. № 8.
- 3 Levanon N., Mozeson E. Radar signals. John Wiley & Sons, Inc., 2004. 411 с.
- 4 Lehtinen M., Damtie B., Nygren T. Optimal binary phase codes and sidelobe-free decoding filters with application to incoherent scatter radar // *Annales Geophysicae*. 2004. T. 22. С. 1623—1632.
- 5 Korshunov A. Yu., Mazayan N. R., Nikolaev S. P., Sinitsin E. A., Fridman L. B., Shildkret A. B. Phase-shift keyed signal compression using a mismatched sidelobe-free filter in the presence of Doppler frequency shift // *Proc. of CriMiCo'2012 — 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings (Sevastopol, Sept. 2—8, 2012)* — С. 1084—1085.
- 6 Cho J. Y. N. Multi-PRI signal processing for the terminal Doppler weather radar. Part II: Range-velocity ambiguity mitigation // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 22. 2005. С. 1507—1519.
- 7 Фридман Л. Б., Коршунов А. Ю., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Синицын Е. А., Шильдкрет А. Б. Эффективность метода раскрытия неоднозначности измерения дальности для первичных радиолокационных станций // *Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»*. 2013. № 1 (9). С. 54—58.
- 8 Korshunov A. Yu., Fridman L. B., Sinitsin E. A. Effectiveness of range ambiguity mitigation in primary radars when using signals with high pulse-repetition frequency // *Proc. of CriMiCo 2013 — 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings (Sevastopol, Sept. 8—14, 2013)*. — С. 1154—1155.
- 9 Barker R. Group Synchronizing of Binary Digital Systems, in: *Communications Theory*, edited by W. Jackson. Academic Press, 1953. С. 273—287.
- 10 Fridman L. B., Ershov G. A., Myasnikov S. A., Perelomov V. N., Sinitsin E. A. Compression of phase-shift keyed signals by means of the mismatched sidelobe-free filter with application to coherent pulse radar // *Proc. of European Microwave Week 2017 : “A Prime Year for a Prime Event,” EuMW 2017 — Conference Proceedings; 14th European Microwave Conference, EURAD 2017 (Nuremberg, Germany, Oct. 12—14, 2017)*. — С. 235—238.

Информация об авторах

Фридман Леонид Борисович, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Синицын Евгений Александрович, Главный конструктор по системам радиолокации Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Ершов Герман Анатольевич, Заместитель генерального конструктора — начальник управления проектами Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Leonid B. Fridman, senior scientific researcher of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St.-Petersburg, Russian Federation.

Eugeny A. Sinitin, chief designer of radar systems of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St.-Petersburg, Russian Federation.

German A. Ershov, deputy general designer – head of project management of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St.-Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.396.62

Синтез и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией и минимальным уровнем боковых лепестков¹

Синицын Е. А., Фридман Л. Б., Ершов Г. А.

*Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт
радиоаппаратуры»
пр. Обуховской обороны, 120, Санкт-Петербург, 192012, Российская Федерация
esinit@yandex.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Представлены результаты оптимизации закона нелинейной частотной модуляции сложных радиолокационных сигналов и соответствующего фильтра сжатия, обеспечивающих минимальный уровень боковых лепестков и низкие потери для выходного сигнала приемного канала когерентно-импульсных радиолокационных станций управления воздушным движением. Показано, что потери рассогласования при оптимизации коэффициентов закона нелинейной частотной модуляции мало отличаются для разных длительностей зондирующих импульсов, что делает возможным применение предложенного закона как для сигналов с большой базой (большой длительности), так и для сигналов с малой и средней базой. По результатам исследований продемонстрировано, что сочетание фильтра, синтезированного по методу обратных пульсаций, и оптимизированного закона нелинейной частотной модуляции позволяет получить сжатый сигнал с очень низким уровнем боковых лепестков (минус 100 дБ и ниже относительно главного лепестка) и пренебрежимо малыми потерями в отношении сигнал/шум (менее 0,1 дБ).

Ключевые слова: нелинейная частотная модуляция, фильтр сжатия, уровень боковых лепестков, отношение сигнал/шум, радиолокационные станции управления воздушным движением.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Синицын Е. А., Фридман Л. Б., Ершов Г. А. Синтез и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией и минимальным уровнем боковых лепестков // Информационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 174—179.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Синицын, Е. А. Синтез и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией и минимальным уровнем боковых лепестков / Е. А. Синицын, Л. Б. Фридман, Г. А. Ершов // Информационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 174—179.

Synthesis and processing of pulse radar signals with nonlinear frequency modulation and minimum sidelobe level

E. A. Sinitsin, L. B. Fridman, and G. A. Ershov

Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”

120, Pr. Obukhovskoi Oborony, S-Petersburg, 192012, Russian Federation
lenya2002@bk.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The results of optimization of the law of nonlinear frequency modulation for wideband radar signals and of the corresponding compression filter are presented. The criteria used in the optimization were minimum sidelobe level and power loss in the output signal of the receiving channels of coherent pulse air traffic control radars. It is shown that the mismatch losses at the optimization of the coefficients of the nonlinear frequency modulation law are slightly different for different durations of transmitted pulses. In this regard, it is possible to apply the proposed law for both large-base (long duration) and small and medium base signals. According to the results of the research, it is demonstrated that the combination of the filter synthesized by the method of inverse pulsations and the optimized law of nonlinear frequency modulation allows to obtain a compressed signal with a very low sidelobe level (minus 100 dB and below relative to the main peak) and negligible signal-to-noise losses (less than 0.1 dB).

Keywords: nonlinear frequency modulation, compression filter, sidelobe level, signal-to-noise ratio, air traffic control radars.

For citation (IEEE): E. A. Sinitsin et al. “Synthesis and processing of pulse radar signals with nonlinear frequency modulation and minimum sidelobe level,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 174–179, 2019. (In Russ.).
doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.16

1. Введение

В настоящее время в радиолокационных станциях (РЛС) управления воздушным движением (УВД) применяют длинные (десятки и сотни микросекунд) зондирующие радиоимпульсы с частотной модуляцией [1, 2]. Большая длительность импульса обеспечивает энергию сигнала, необходимую для обнаружения воздушных целей на больших дальностях, а внутриимпульсная частотная модуляция (ЧМ) — требуемое разрешение и необходимые точностные характеристики по дальности после согласованной обработки (сжатия) принимаемых радиолокационных сигналов. Применение принципа сжатия позволяет использовать передатчики меньшей импульсной мощности, что значительно снижает стоимость РЛС и повышает ее надежность. Однако такой подход имеет два недостатка, приводящих к снижению вероятности правильного обнаружения воздушных объектов: появление боковых лепестков в сжатом сигнале, которые могут маскировать слабые цели, и потери в отношении сигнал/шум (ОСШ), обусловленные применением способов сжатия, отличных от оптимальных.

Цель работы — синтез импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией, обеспечивающих минимизацию уровня боковых лепестков и потерь сжатого сигнала.

2. Объект исследований и применение метода обратных пульсаций

Объект исследований — формирование и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ) по методу обратных пульсаций (МОП) [1], использование которого для минимизации уровня боковых лепестков (УБЛ) позволяет представить передаточную характеристику фильтра сжатия в виде выражения

$$\dot{H}(f) = \frac{L(f)}{\dot{S}_{\text{ex}}(f)}, \quad (1)$$

где $L(f)$ — требуемый амплитудный спектр сжатого сигнала, $S_{\text{ex}}(f)$ — спектр входного сигнала.

В качестве $L(f)$ может быть использована весовая функция (ВФ) Дольфа — Чебышева, гарантирующая заданный УБЛ при минимальной длительности основного лепестка, ее тейлоровская аппроксимация [2] или ВФ Гаусса [3, 4]. Недостаток прямого использования МОП — высокая чувствительность к доплеровскому сдвигу частоты, что обусловлено френелевскими пульсациями в спектре исходного НЧМ импульса. В [2, 5, 6]

показано, что уменьшение пульсаций может достигаться путем сглаживания фронта и среза НЧМ импульса, однако для радиолокационных систем высокой мощности желательно найти метод регулирования амплитудных пульсаций спектра, который бы не требовал необходимости регулировки огибающей НЧМ импульса. Этого можно достигнуть предискажением закона частотной модуляции сигнала.

3. УБЛ и потеря сжатия НЧМ сигналов

Показано, что предискажение закона ЧМ на краях импульса приводит к уменьшению пульсаций в его спектре, при этом функция предискажения ЧМ должна иметь участки резкого возрастания частоты на краях импульса. Так для линейной ЧМ (ЛЧМ) предискажение закона частотной модуляции позволяет снизить уровень пульсаций на вершине спектра ЛЧМ импульса примерно в 2 раза.

Отмечается, что дальнейшего снижения пульсаций в спектре можно добиться, применив закон НЧМ вида

$$f(t) = \frac{t}{\tau} \left(\Delta F_L + \Delta F_C \frac{1}{\sqrt{1 - 4(t^2 / \tau^2)}} \right), -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2}, \quad (2)$$

где ΔF_L — девиация частоты линейного члена, ΔF_C — девиация частоты нелинейного члена, τ — длительность импульса.

На типовом примере $\tau=50$ мкс, $\Delta F_L=0,5$ МГц, $\Delta F_C=0,12$ МГц для закона (2) продемонстрировано, что спектр сигнала принимает вид гауссовой кривой с малым уровнем пульсаций.

Показано, что подбирая закон ЧМ сигнала, можно добиться минимальных потерь в ОСШ. В частности, этого можно достичь, оптимизируя коэффициенты в выражении (2) для НЧМ сигнала, и обеспечить такое взаимодействие сигнала с фильтром, при котором чувствительность к доплеровским сдвигам частоты будет меньше, чем при использовании ЛЧМ импульса, а потери в ОСШ будут минимальны. Для минимизации потерь НЧМ сигнала требуется найти такие значения ΔF_L и ΔF_C при заданной $L(f)$, при которых будет достигаться минимальное значение полученного выражения

$$\min_{\Delta F_L, \Delta F_C} \left(10 \lg \left(\frac{E_s}{W_0} \right) - 10 \lg \left(\frac{\max_t \left(\left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{\omega}(f) \dot{H}(f) e^{j2\pi f t} df \right|^2 \right)}{\int_{-\infty}^{\infty} W_0 |\dot{H}(f)|^2 df} \right) \right), \quad (3)$$

где E_S и W_0 — энергия сигнала и спектральная плотность мощности шума соответственно.

4. Заключение

Отмечается, что между требуемым значением уровня боковых лепестков, регулируемым при помощи ВФ передаточной характеристики фильтра сжатия, и длительностью сжатого сигнала наблюдается обратная зависимость, поэтому требования достижения одновременно низкого УБЛ и малой длительности сжатого сигнала противоречивы, а весовая функция передаточной характеристики фильтра должна выбираться с учетом компромиссного выполнения данных требований для заданной ширины полосы пропускания приемного канала РЛС.

Показано, что потери рассогласования при оптимизации коэффициентов закона НЧМ мало отличаются для разных длительностей зондирующих импульсов, что делает возможным применение закона (2) как для сигналов с большой базой (большой длительности), так и для сигналов с малой и средней базой. Исключения составляют некоторые частные случаи с весовыми функциями Дольфа — Чебышева и Гаусса.

По результатам исследований продемонстрировано, что сочетание фильтра, синтезированного по методу обратных пульсаций, и оптимизированного закона нелинейной частотной модуляции позволяет получить сжатый сигнал с очень низким УБЛ (минус 100 дБ и ниже относительно главного лепестка) и пренебрежимо малыми потерями в ОСШ (менее 0,1 дБ).

Список литературы

1. Родионов В. В. и др. Методы формирования и обработки радиолокационных сигналов с малой базой и низким уровнем боковых лепестков функции неопределенности по дальности. В кн. : VII Междунар. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Т. 3 (Воронеж, 2001 г.). 2001. С. 1460—1467.
2. Кук Ч. , Бернфельд М. Радиолокационные сигналы : пер. с англ. / Под ред. В. С. Кельзона. М. : Сов. Радио, 1971. 568 с.
3. Хэррис Ф. Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. Т. 66, № 1. С. 60—96.
4. Андриенко В. Б., Беседа А. Л. и др. Когерентная обработка сигналов в первичных радиолокационных станциях. СПб, 2008. 234 с.
5. Оконешников В. С. Кочемасов В. Н. Сжатие частотно-модулированных сигналов с небольшим произведением девиации частоты на длительность импульса // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 1. С. 82—94.
6. Беседа А.Л. Зубков М.В. Сигналы с нелинейной частотной модуляцией, имеющие низкий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции // Вопросы радиоэлектроники. Серия радиолокационная техника. 2008. Вып. 2. С. 101—112.

7. Nadav Levanon, Eli Mozeson. Radar Signals. IEEE Press, 2004. 427 с.
8. Price, R. Chebyshev low pulse compression sidelobes via nonlinear FM // National Radio Science Meeting of URSI (Seattle, WA June 18, 1979).

Информация об авторах

Синицын Евгений Александрович, Главный конструктор по системам радиолокации Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Фридман Леонид Борисович, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Ершов Герман Анатольевич, Заместитель генерального конструктора — начальник управления проектами Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Eugeny A. Sinitin, chief designer of radar systems of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St-Petersburg, Russian Federation.

Leonid B. Fridman, senior scientific researcher of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St-Petersburg, Russian Federation.

German A. Ershov, deputy general designer – head of project management of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St-Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.316

Способ вычисления суммарной энергии поля СВЧ, образующейся в экранирующем корпусе, с использованием численных методов моделирования¹

Бутин В. И., Кундышев П. Я., Руденко Ю. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н. Л. Духова

ул. Суцневская, 22, Москва, 127055, Российская Федерация

butinvi@yandex.ru, enniofilm@mail.ru, vniia@vniia.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: *Исследуется эффективность экранирования с учетом аккумулированной внутри металлического корпуса аппаратуры энергии высокочастотного электромагнитного поля с использованием численных методов интегрирования и результатов трехмерного моделирования электродинамических задач. Как следует из анализа существующих программных продуктов, отсутствует возможность непосредственного получения значения энергии поля, запасенной в произвольном объеме, в качестве конечного результата. На простейшем примере идеального цилиндрического корпуса продемонстрирована возможность оценки экранирующей способности конструкции на основе аккумулированной энергии с применением численного интегрирования по ограниченному корпусом объему методом трапеций. Проведен тестовый расчет экранирующей способности корпуса на основе данных об энергии поля, аккумулированной в подкорпусном пространстве модельного объекта, полученных на основе результатов моделирования в среде FEKO, которые подтверждены экспериментально с высокой точностью. Разработанная методика позволяет определить влияние различных конструктивных параметров, например, таких как размеры неоднородностей корпуса, на эффективность экранирования конструкций корпусов сложных форм.*

Ключевые слова: *радиоэлектронная аппаратура (РЭА), эффективность экранирования, корпус, моделирование, FEKO, численные методы, формула трапеций.*

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо-2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Бутин В. И., Кундышев П. Я., Руденко Ю. А. Способ вычисления суммарной энергии поля СВЧ, образующейся в экранирующем корпусе, с использованием численных методов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 180—191.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Бутин, В. И. Способ вычисления суммарной энергии поля СВЧ, образующейся в экранирующем корпусе, с использованием численных методов / В. И. Бутин, П. Я. Кундышев, Ю. А. Руденко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 180—191.

Calculation of microwave energy accumulated inside the shielded volume of electronics using numerical simulation

V. I. Butin, P. Ya. Kundyshev, and Y. A. Rudenko
Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)
22, ul. Sushchevskaya, Moscow, 127055, Russian Federation
butinvi@yandex.ru, enniofilm@mail.ru, vniia@vniia.ru

Received: September 8, 2019
Peer-reviewed: September 13, 2019
Accepted: September 16, 2019

Abstract: In this paper the shielding effectiveness calculation based on the microwave energy stored inside the metal shield of electronics is calculated with a numerical method of integration and three-dimension electromagnetic simulation tool FEKO. It was found no option in extant electrodynamics simulators to obtain the quantity of energy amount accumulated in random volume as final result. Basing on the simulation of electric intensities dispersed in the region the energy is derived via numerical trapezoid method of the integration over the volume in the simplest example of ideal cylinder shield. Considering high level of simulation accuracy in FEKO for determination of the electric intensity inside a variety of shielding enclosures the shielding effect based on the energy data in test housing was calculated. The procedure obtained can be used to identify the dependence between the shielding effectiveness and different parameters, e.g. the size of the apertures in the shield with complex shapes.

Keywords: electronics, shielding effectiveness, housing, simulation, FEKO, numerical methods, trapezoid method.

For citation (IEEE): V. I. Butin, P. Ya. Kundyshev, and Y. A. Rudenko, “Calculation of microwave energy accumulated inside the shielded volume of electronics using numerical simulation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 180–191. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.17

1. Введение

Эффективность электромагнитного экранирования конструкции аппаратуры в настоящее время может быть оценена на основании полученных значений напряженности электрической компоненты ЭМП в заданной точке пространства внутри корпуса. Вывод о степени проникновения ЭМП в диапазоне ВЧ—СВЧ при этом, в большинстве случаев, делается упрощенно путем рассмотрения напряженности в одной или нескольких точках внутри исследуемого корпуса. При этом, однако, теряется пространственная локализация ЭМП внутри конструкции, что может стать причиной невыявления наиболее критичных мест внутри аппаратуры со значительными уровнями напряженности, которые потенциально могут привести к нарушению работоспособности аппаратуры РЭА.

Для преодоления данной проблемы следует дискретизировать все пространство внутри корпуса РЭА для поиска и выявления таких проблемных областей. Этот метод успешно используется в практике как отечественного моделирования, так и за рубежом [1—3]. При этом возрастает объем данных для обработки.

Рассмотрим наиболее типовую ситуацию, изображенную на рисунке 1а.

Пусть требуется смоделировать электромагнитную обстановку в предполагаемом месте расположения чувствительных приборов (содержащих, например, интегральные микросхемы, компоненты ЭКБ и др.), расположенных внутри цилиндрического корпуса РЭА. Приборы (показаны условно в виде цилиндров) соединены друг с другом произвольными проводными соединениями (например, двухпроводным монтажом). На корпусе РЭА имеется единственная неоднородность (узкая щель), которая является источником переизлучения ЭМП во внутреннюю область корпуса. Воздействие ЭМП осуществляется в СВЧ-диапазоне, при этом размеры корпуса РЭА являются электрически длинными по отношению к длине волны воздействующего излучения. Результаты моделирования распределения напряженности ЭМП показаны в сечениях на рисунке 1(б) и (в). Как можно видеть, распределение ЭМП имеет, в общем случае, градиентный характер. В случае, если размеры прибора и длины проводных линий связи малы в сравнении с характерными размерами области неоднородности ЭМП, можно полагать, что прибор будет облучаться с приблизительно одинаковыми уровнями ЭМП (см. рисунок 1б и 1в справа). Однако, в случае облучения на резонансных частотах, т.е. при совпадении длин волн с размерами корпуса градиентный характер будет ярко выра-

женным (см. рисунки 1б и 1в слева). Это приведет к тому, что различные части приборов будут подвергаться различным уровням облучения. При этом не ясно, какими уровнями воздействия ЭМП будет подвергаться исходная система «Прибор 1 — проводные соединения — Прибор 2». Это может привести к искажению результатов оценки и снижению достоверности моделирования.

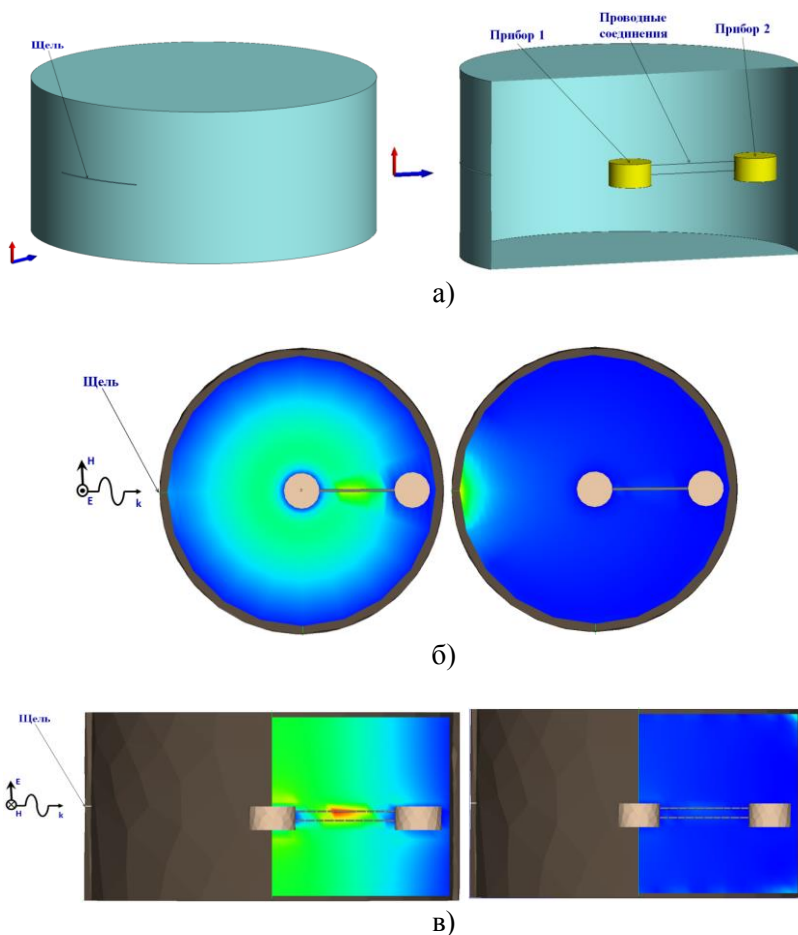


Рис. 1. Воздействие ЭМП СВЧ-диапазона на цилиндрический экран из металла со щелью (а). Распределение напряженности электрической составляющей ЭМП в сечениях экрана — продольном (б) и поперечном (в).

Fig. 1. Microwave interaction with cylindrical metal shield with slit (a). Electric field distribution along the center axis (b) and in the cross-section (c)

Выходом из сложившейся ситуации является оценка экранирующей способности конструкции по суммарной энергии ЭМП, воздействующей на приборы (или на чувствительные составные части), а не на основании дискретных значений напряженности ЭМП. В работах [4—8] представлены результаты сопоставления расчетов, проведенных с использованием среды FEKO [9], с модельными экспериментами в части определения напряженности поля, прошедшего внутрь экранирующих конструкций типовых РЭА. Анализ результатов указывает на высокую точность определения ЭМП, что позволяет использовать FEKO при проведении расчетов напряженности ЭМП в конкретных точках пространства внутри корпусов РЭА, в т.ч. для получения распределения ЭМП по всему занимаемому объему. Вывод результатов моделирования осуществляется по компонентам на конкретной частоте. В цилиндрической системе координат результат может быть представлен по компонентам E_ρ , E_ϕ , E_z , а также в виде модуля $|E| = \sqrt{E_\rho^2 + E_\phi^2 + E_z^2}$.

Однако наряду с широкими возможностями в части вывода значений напряженностей ЭМП, как в FEKO, так и в большинстве аналогичных программных продуктов отсутствуют опции по определению суммарной энергии ЭМП, аккумулированной внутри произвольного объема внутри корпуса. Это и обуславливает интерес к разработке собственной методики по оценке накопленной внутри исследуемой конструкции энергии при внешнем воздействии ЭМП СВЧ-диапазона, имея в распоряжении в качестве исходных данных преимущественно компоненты напряженностей E_ρ , E_ϕ и E_z для заданного массива расчетных точек. Дальнейший расчет энергии в рассматриваемом объеме проводится с использованием численного интегрирования методом трапеций. Для примера проведен расчет экранирующей способности корпуса на основании энергии, которая может воздействующей на типовые компоненты РЭА, размещенные внутри металлического корпуса.

2. Определение эффективности экранирования конструкции по энергетическому фактору

Требуется определить экранирующую способность конструкции на основе суммарной энергии, которая может воздействовать на прибор (компонент РЭА), расположенный внутри корпуса РЭА.

Положим корпус РЭА, изготовленный из металла, в виде тонкостенного цилиндра (см. рисунок 2). Пусть по результатам моделирования (например, в FEKO) получено распределение напряженности ЭМП (E_p , E_φ , E_z) внутри корпуса в виде дискретной сетки в заданных интересующих точках. В первую очередь, необходимо рассчитать энергию ЭМП W_Σ , аккумулированную в заданном ограниченном пространстве внутри экрана. Примем далее при рассмотрении, что ЭМП является гармоническим и постоянного действующим во времени, т. е. все виды потерь ЭМП при распространении в корпусе (рассеиваемая мощность в металлических стенках корпуса, в диэлектрическом материале и пр.) скомпенсированы постоянно восполняемой энергией поступающего ЭМП.

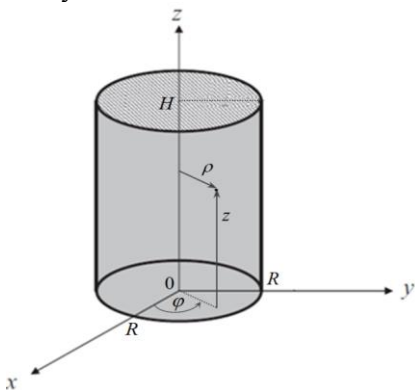


Рис. 2. Тонкостенный цилиндрический экран в декартовой и цилиндрической системах координат.

Fig. 2. Thin cylindrical shield in rectangular and cylindrical coordinates

Так, в общем виде энергия, аккумулированная в экране, W_Σ , представима в виде [10]

$$W_\Sigma = W_e + W_m, \quad (1)$$

где $W_e = \frac{1}{2} \int_V \epsilon |E|^2 dV$ — энергия, запасенная в электрическом поле,

$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mu |H|^2 dV$ — энергия, запасенная в магнитной поле, $\epsilon = \epsilon_{cp} \epsilon_0$ и $\mu = \mu_{cp} \mu_0$ — диэлектрическая и магнитная проницаемости материала среды внутри экрана, $\epsilon_{cp}, \mu_{cp}, \epsilon_0, \mu_0$ — относительные диэлектрическая и

магнитная проницаемости среды внутри экрана, диэлектрическая и магнитная постоянные соответственно, E и H — модули напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМП внутри экрана соответственно, V — объем, ограниченный экраном.

Рассмотрим отдельно выражение для энергии, запасенной в электрическом поле. Вынесем диэлектрическую постоянную за знак интегрирования, предполагая однородность диэлектрических свойств среды внутри корпуса:

$$W_e = \frac{\varepsilon}{2} \int_V E^2 dV. \quad (2)$$

Рассмотрим подынтегральное выражение. Учитывая цилиндрическую геометрию задачи, целесообразно перейти от прямоугольной системы координат (x, y, z) в цилиндрическую (ρ, φ, z) :

$$\begin{aligned} \int_V E^2 dV &= \iiint_{x,y,z} E^2(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{\rho, \varphi, z} \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho d\varphi dz = \\ &= \int_{\rho=0}^R \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{z=0}^H \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho d\varphi dz, \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ — множитель (якобиан), образующийся при переходе в интеграле по объему из декартовой в цилиндрическую систему координат, $E(\rho, \varphi, z)$ — напряженность электрической составляющей ЭМП в заданной точке внутри экрана.

Учитывая взаимную независимость пределов интегрирования в цилиндрической системе координат, изменим последовательность интегрирования:

$$\int_{\rho=0}^R \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{z=0}^H \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho d\varphi dz = \int_{z=0}^H \int_{\varphi=0}^{2\pi} \left[\int_{\rho=0}^R \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho \right] d\varphi dz. \quad (4)$$

В выражении (4) интеграл в скобках рассчитаем численно, используя метод трапеций [11, 12]:

$$\int_a^b f(x) dx \approx k_x \sum_{n=0}^{N_x-1} \left(\frac{f(x_n) + f(x_{n+1})}{2} \right), \quad (5)$$

где $k_x = \frac{b-a}{N}$ — постоянный шаг дискретизации по x , N — число отрезков разбиений.

Выбор метода трапеций условный и связан с простотой вычислений по значениям подинтегральной функции только в крайних точках элементарного отрезка, что позволяет использовать результаты поточечных расчетов в применяемом программном обеспечении (типа ФЕКО и пр.). При необходимости увеличения точности (либо уменьшения времени вычислений) можно уменьшить (либо увеличить) шаг дискретизации, либо можно использовать также методы Симпсона или прямоугольников соответственно.

Применяя формулу трапеций для вычисления интегралов по всем цилиндрическим координатам как для электрической, так и для магнитной составляющих ЭМП, получаем оценку для суммарной энергии поля в виде:

$$W_{\Sigma} = \frac{1}{16} k_p k_{\phi} k_z \varepsilon_{\text{ср.}} \varepsilon_0 F_E + \frac{1}{16} k_p k_{\phi} k_z \mu_{\text{ср.}} \mu_0 F_H, \quad (6)$$

где первое слагаемое выражения (6) определяет часть энергии, аккумулированной в электрическом поле, второе — в магнитном поле; k_p , k_{ϕ} , k_z — шаги дискретизации по цилиндрическим координатам ρ , ϕ , z соответственно; F_E и F_H — множители, образующиеся в результате численного интегрирования тройных интегралов в формулах для электрической и магнитной составляющих ЭМП по формуле трапеций (5).

Основываясь на принятой терминологии [1—3], определим эффективность экранирования по энергетическому признаку как:

$$SE_w = 10 \lg \left(\frac{W_i}{W_{\Sigma}} \right), \quad (7)$$

где W_{Σ} — энергия, аккумулированная во внутреннем пространстве внутри экрана, которая рассчитывается по формуле (6),

$W_i = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon |E_i|^2 dV + \frac{1}{2} \int_V \mu |H_i|^2 dV$ — энергия ЭМП, сосредоточенная в том же пространстве при отсутствии экрана, E_i и H_i — электрическая и магнитная составляющие напряженности воздействующего ЭМП.

Выражения (6—7) позволяют оценить экранирующую способность конструкции как функцию энергии, аккумулированной в рассматриваемой области подкорпусного пространства.

3. Пример расчета

Рассмотрим ситуацию, изображенную на рисунке 1. В полой цилиндрическом корпусе из алюминия (радиус $R = 180$ мм, высота $H = 200$ мм, толщина стенок $\Delta = 1$ мм) присутствует щель толщиной 1 мм и шириной

100 мм, через которую ЭМП с напряженностью электрической составляющей E_i проникает во внутреннюю область корпуса. Рассчитаем суммарную энергию, воздействующую на приборы, которые расположены внутри корпуса, а также экранирующей способности данной конструкции.

Для этого, в первую очередь, проведем моделирование распределения напряженности ЭМП во внутреннем пространстве корпуса при условии отсутствия приборов. Это допустимо для оценки суммарной энергии, которая может оказывать воздействие на эти приборы. Для удобства обработки данных зададим шаги дискретизации по всем цилиндрическим координатам $k_p = k_\phi = k_z = 10$. Сетка с расчетными точками показана схематично на рисунке 3.

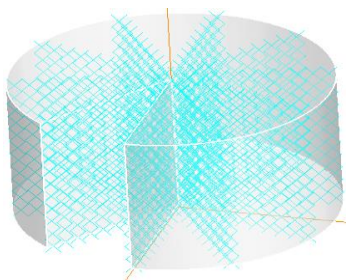


Рис. 3. Расчетная сетка внутренней области цилиндрического корпуса.

Fig. 3. Meshing points inside the cylindrical medium

Далее определим исследуемый частотный диапазон. Отметим, что наибольший интерес представляет частотная область СВЧ-диапазона, при которой наблюдаются резонансные эффекты, обуславливающие повышенную степень проникновения ЭМП внутрь корпуса [13]. Исходя из этого, определим резонансную частоту, соответствующую основной моде корпуса как цилиндрического резонатора при внешнем электромагнитном

облучении. В силу выполнения соотношения $\frac{d}{a} = \frac{198 \cdot 10^{-3}}{179 \cdot 10^{-3}} \approx 1,11 < 2$ (где $d = H - 2\Delta$ и $a = R - \Delta$) основной является мода TM_{010} [10]. В общем виде значения резонансных частот колебаний ЭМП в замкнутом цилиндрическом объеме для TM моды определяются как

$$f_{npq}^{TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{\chi_{np}}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d}\right)^2}, \quad (8)$$

где χ_{np} — нули функции Бесселя $J_n(x) = 0$ порядка n ($n = 0, 1, 2, \dots$), p — порядковый номер соответствующего нуля данной функции ($p = 1, 2, 3, \dots$),

n, p, q — целочисленные индексы, характеризующие количество полуволн, укладываемых по периметру продольного сечения корпуса, вдоль его радиуса в продольном сечении и вдоль высоты в его поперечном сечении соответственно.

Соответственно, подставляя все параметры корпуса, получаем $f_{010}^{TM} = 641$ МГц. Для сравнения проведем расчет в заведомо нерезонансных частотных областях и вблизи резонанса. Выберем для данного случая частотный диапазон с 500 до 1500 МГц.

В первую очередь, оценим экранирующие свойства корпуса по напряженности электрической составляющей ЭМП в исследуемом частотном диапазоне. На рисунке 4 приведена частотная зависимость эффективности экранирования $SE_E = 20\lg(E_i / E_o)$, где E_o — напряженность электрической составляющей ЭМП в точке пространства, рассчитанной в центре экранирующей корпуса, а также SE_w , рассчитанная по формуле (7).

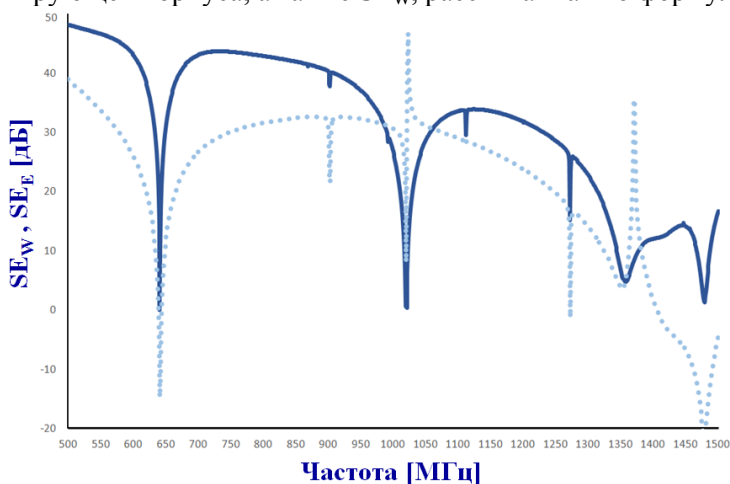


Рис. 4. Частотная зависимость эффективности экранирования (SE_E), рассчитанная в центре корпуса (пунктирная линия), и SE_w (прямая линия).
 Fig. 4. Shielding effectiveness (SE_E) calculated in the center of the shield (dot line) and SE_w (flat line)

Резонансные частоты, как это следует из анализа данных на рисунке 4, имеют максимумы в районе частоты 641 МГц.

Анализ полученных результатов указывает на ярко выраженное увеличение энергии, аккумулированной во внутреннем объеме корпуса при облучении его на резонансных частотах. Уровни энергии могут на 3—4 порядка быть выше, чем в нерезонансной области. Это может привести к

тому, что чувствительные приборы, помещенные в защитный корпус, при облучении на резонансных частотах будут подвергнуты значительно более высокому воздействию ЭМП по сравнению с облучением вне резонансной области. Эффективность экранирования, соответственно, будет иметь минимум на резонансной частоте корпуса.

Безусловно, размеры щели и взаимное расположение векторов напряженности ЭМП относительно корпуса будут влиять на величину энергии, аккумулированной внутри экранирующей конструкции. Это, в первую очередь, касается преимущественно резонансной области, что также представляет интерес при дальнейшем исследовании экранирующей способности конструкции в СВЧ-диапазоне воздействующего ЭМП.

4. Заключение

В данной работе было проведено исследование эффективности экранирования на основе данных об энергии высокочастотного электромагнитного поля, аккумулированной внутри металлического корпуса аппаратуры, которая может оказывать воздействие на внутренние чувствительные компоненты, используя численные методы трехмерного моделирования электродинамических задач. При оценке энергии, аккумулированной внутри идеального цилиндрического корпуса, согласно разработанной методике использован численный метод трапеций для интегрирования по всему занимаемому пространству. Выполнен тестовый расчет значения аккумулированной энергии в подкорпусном пространстве и экранирующей способности корпуса РЭА. Результаты тестового расчета указывают на ярко выраженное снижение эффективности экранирования вблизи резонансной частоты корпуса. Полученная методика позволяет выявлять зависимость эффективности экранирования и аккумулированной энергии от различных конструктивных параметров, например, таких как размеры неоднородностей в корпусе (щели, отверстия).

Список литературы

1. Кечиев Л. Н., Акбашев Б. Б., Степанов П. В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. М. : ООО «Группа ИДТ», 2010. 470 с.
2. Celozzi S., Araneo R., Lovat G. Electromagnetic shielding. John Wiley and Sons, Inc. IEEE Press: Hoboken, New Jersey, 2008. 358 с.
3. Celozzi S. New figures of merit for the characterization of the performance of shielding enclosures. IEEE Transactions on EMC. 2004. T. EMC-46. № 1. С. 142.
4. Butin V., Kundyshchev P. Immunity Testing Research Method of Unmanned Aerial Vehicle System with Limited Operational Life // 2015 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC). Taipei, Taiwan, 2015. С. 33—36.

5. Butin V. I., Kundyshev P. Ya. Inner filled constructive material effect on shielding effectiveness of screened electronics in resonance mode // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2016, T. 151, № 1. С. 1—5.
6. Butin V., Kundyshev P. Inner filled constructive material effect on shielding effectiveness of screened electronics in resonance regime // 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Shenzhen, China. 2016. Т. 01. С. 91—93.
7. Butin V., Kundyshev P. Study of Currents Induced in Wire Lines Placed inside the Metal Shield of Electronics in the Beginning of the Resonance Mode // 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Seoul, Korea. 2017. С. 172—174.
8. Бутин В. И., Кундышев П. Я. Исследование экранирующих свойств корпусов РЭА и наведенных токов в типовых проводных соединениях при воздействии СВЧ излучений // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 1 (64). С. 32—43.
9. FEKO website. Доступен на <http://www.feko.info>;
<http://www.altairhyperworks.com/FEKO> (доступ 1 августа 2019).
10. Harrington R. F. Time-harmonic electromagnetic fields / An IEEE Press Classic Reissue. John Wiley and Sons, 2001. 490 с.
11. Бахвалов Н. С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). М. : Наука, 1975. 631 с.
12. Калиткин Н. Н. Численные методы. М. : Наука, 1978. 512 с.

Информация об авторах

Бутин Валентин Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отделения ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва, Российская Федерация.

Кундышев Павел Ярославович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва, Российская Федерация.

Руденко Юрий Алексеевич, научный сотрудник ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Valentin I. Butin, Doc. Sci., major researcher, research department director of the Dukhov Research Institute of Automatics “VNIIA”, Moscow, Russian Federation.

Pavel Ya. Kundyshev, Cand. Sci., head of research division, Dukhov Research Institute of Automatics “VNIIA”, Moscow, Russian Federation.

Yuri A. Rudenko, researcher, Dukhov Research Institute of Automatics “VNIIA”, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.371

Микрополосковая антенна круговой поляризации для приема сигналов GPS/ГЛОНАСС

Дурманов М. А., Бобошко А. В.

Севастопольский государственный университет

Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, Российская Федерация
m.a.durmanov@gmail.com

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 5 ноября 2019 г.

Принято к публикации: 5 ноября 2019 г.

Аннотация: Рассмотрены проблемы точности глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Рассмотрены особенности антенны, позволяющие повысить точность приема спутниковых сигналов, за счет минимизации приема переломленных сигналов. Разработана и проанализирована микрополосковая антенна правой круговой поляризации. Микрополосковая антенна реализована с квадратной формой излучателя, в качестве питания имеет схему с двухфидерной коаксиальной запиткой и для ее возбуждения выбран шлейфный квадратурный мост. В AWR Design Environment произведен расчет шлейфного квадратурного моста и его моделирование, а также в CADFEKO построена модель антенны вместе с квадратурным мостом. Проведен расчет характеристик разработанной микрополосковой антенны такие, как КСВ на центральной частоте; коэффициенты отражения портов; диапазон рабочих частот; коэффициент усиления; коэффициент эллиптичности антенны. Данное решение позволит повысить точность позиционирования, а также уменьшить габариты самого приемника за счет небольших размеров антенны.

Ключевые слова: GPS, ГЛОНАСС, микрополосковая антенна, круговая поляризация.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дурманов М. А., Бобошко А. В. Микрополосковая антенна круговой поляризации для приема сигналов GPS/ГЛОНАСС // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 2. С. 192—203.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Дурманов, М. А. Микрополосковая антенна круговой поляризации для приема сигналов GPS/ГЛОНАСС / М. А. Дурманов, А. В. Бобошко // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 192—203.

Microstrip circular polarization antenna for receiving GPS/GLONASS signals

M. A. Durmanov and A. V. Boboshko

Sevastopol State University

Institute of Radio Electronics and Information Security

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

max.durmanov@gmail.com

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: November 5, 2019

Accepted: November 5, 2019

Abstract: In this graduation project, the problem of accuracy of global navigation systems GPS and GLONASS is considered. The aim of the work is to develop a method that would increase the accuracy of satellite signals reception. The best method to increase accuracy is to eliminate/attenuate the reception of re-reflected signals using special antennas. Within the framework of this method, a model of microstrip antenna of the right circular polarization was developed and analyzed. The microstrip antenna with a square shape of the radiator is implemented, has a double-feeder coaxial power supply circuit, and a loop quadrature bridge is used for its excitation. In the AWR Design Environment, a stub quadrature bridge was calculated and modeled. In CADFEKO, an antenna model and quadrature bridge was constructed. The characteristics of the developed microstrip antenna, such as SWR at the center frequency; port reflection coefficients; range of frequencies; gain; antenna ellipticity coefficient. This solution will improve the positioning accuracy, as well as reduce the weight and size of the receiver itself due to the small size of the antenna itself.

Keywords: GPS, GLONASS, microstrip antenna, circular polarization.

For citation: M. A. Durmanov and A. V. Boboshko, "Microstrip circular polarization antenna for receiving GPS/GLONASS signals," *Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 192–203. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.18.

1. Введение

Приемники GPS/ГЛОНАСС сигналов используются для решения разнообразных высокоточных задач на земле, в небе и на море. Навигационные возможности систем могут оказать неоценимую помощь в поиске и спасении людей, в работе полиции, пожарных и др. [1, 2].

Модификации ГЛОНАСС поддиапазона $L1$ (1575,42 МГц) отправляют два типа навигационных сигналов: стандартный сигнал (СТ) для каждого потребителя и высокоточный (ВТ) сигнал, доступный только для определенных потребителей, и только один ВТ в поддиапазоне $L2$ -сигнал (1227,60 МГц).

Навигационный радиосигнал, передаваемый каждым НКА «Глонасс» на его собственной несущей частоте в поддиапазонах $L1$ и $L2$, является многокомпонентным сигналом фазовой манипуляции. Фазовая манипуляция несущей осуществляется на π радиан с максимальной погрешностью не более $\pm 0,2$ радиана.

Сигнал с кодом стандартной точности (C/A-код — модуляция *BPSK*), передаваемый в диапазонах $L1$ и $L2$, распространяется без ограничений на использование.

Многолучевость является главным источником ошибок. Приемник принимает не только сигналы со спутника по прямой линии, но и отраженные от окружающих предметов и земной поверхности. В итоге фазовые измерения по суммарному сигналу имеют искажения, которые могут достигать 50 см, и в случаях, когда отраженный сигнал превышает прямой, эта ошибка может приближаться к 2 м, что составляет 25 % от общей погрешности системы, определяющей местоположение.

Отражающими объектами для приемников могут быть здания, деревья, холмистый рельеф. Многолучевость создается гладкой земной поверхностью — асфальт, вода, снежный покров. Крыши также имеют много отражающих объектов, что плохо влияет на прием сигнала.

Для уменьшения влияния многолучевости необходимо при разработке антенных систем для приемников предусмотреть установку экранирующих приспособлений, препятствующих попаданию отраженных радиосигналов на вход антенны или использовать специальную конструкцию антенны.

На сегодняшний момент точность определения местоположения для обычного потребителя *GPS* составляет 3,6 м (2σ), ГЛОНАСС — 8 м (2σ) [3].

В статье приведены результаты моделирования микрополосковой антенны (МПА), которая принимает сигналы только с правосторонней круговой поляризацией, чтобы минимизировать прием переотраженных сигналов, так как однократно отраженный сигнал меняет поляризацию на противоположную.

МПА имеют низкий профиль, подходящий плоской и криволинейной поверхностям. Благодаря использованию современной печатной технологии, МПА просты и недороги в изготовлении. МПА являются меха-

нически прочными при установке на жесткие поверхности, и когда выбраны конкретная форма и режим патча, они адаптивны при выборе резонансной частоты, поляризации и импеданса.

Исходя из этого, для разработки была выбрана микрополосковая антенна на частоте 1,242 ГГц. Данная частота используется в диапазоне частот $L2$ для GPS и ГЛОНАСС. В ГЛОНАСС на этой частоте передается сигнал высокой точности, доступный только особым потребителям, но только с разрешения Министерства обороны Российской Федерации.

Основные технические решения получены путем моделирования в программных средах *AWR Design Environment* и *CADFEKO*.

2. Исследуемая модель

Чем выше точность измерений, тем более высокими становятся требования к антенне приемника. Чтобы антенна имела указанную характеристику, она должна иметь двухполосную или четырехполосную цепь питания. Способность антенны принимать только сигнал с правосторонней круговой поляризацией также предохраняет от многолучевости, так как однократно отраженный сигнал меняет поляризацию на противоположную.

Одним из основных факторов, ограничивающих точность позиционирования, является многолучевое распространение. Основой спутниковой навигации является вычисление расстояний (псевдодальностей) от спутников до потребителя (рис. 1а). Чем точнее измерены расстояния, тем точнее вычисляются координаты.

Путь, пройденный сигналом от спутника до потребителя при переотражении, больше истинного расстояния, отсюда следует, что увеличивается погрешность позиционирования (рис. 1б).

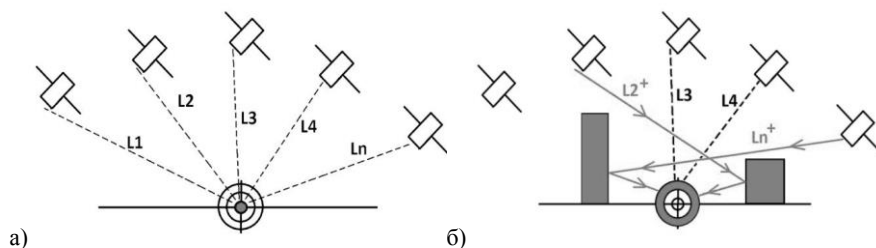


Рис. 1. Схема приема сигнала без переотражений (а) и с переотражениями (б).

Fig. 1. GNSS signal reception scheme without reflections (a) and with reflections (b)

Наилучшим методом борьбы с данным явлением будет исключение или ослабление приема переотраженных сигналов, с использованием специальных антенн.

Спутники ГЛОНАСС/GPS излучают сигналы с правосторонней круговой поляризацией (*RHCP* — англ.). При отражении сигнал меняет свою поляризацию на противоположную (*LHCP* — англ.).

Антенны с хорошо выраженными поляризационными характеристиками принимают сигналы собственной поляризации, а сигналы с противоположной поляризацией со значительным ослаблением. Т. е. *RHCP*-антенна принимает прямые *RHCP* сигналы, а переотраженные *LHCP* сигналы подавляет (рис. 2).

Степень ослабления сигналов противоположных поляризации характеризуется коэффициентом эллиптичности (*AR* — англ.). Определяется данное значение соотношением ортогональных составляющих вектора электрического поля для волны с идеальной круговой поляризацией $AR = 1$ (или 0 дБ).

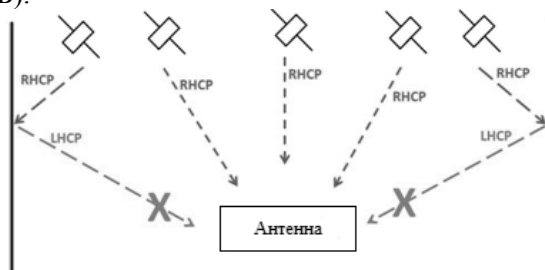


Рис. 2. Схема приема сигналов антенной с правой круговой поляризацией.

Fig. 2. Right circular polarized antenna signal receiving circuit

В подавляющем большинстве недорогих антенн используется однофидерный керамический «*patch*»-элемент. Такие антенны могут обладать круговой поляризацией только на одной частоте, в остальной же полосе поляризация близка к линейной (особенно вблизи краев полосы). Причем это условие выполняется только при рекомендованном производителем земляном полигоне или соответствующей подстройке, что на практике практически не встречается. Теоретический *AR* однофидерной ГЛОНАСС/GPS «*patch*» антенны –8 дБ (на практике больше). Антенны с двухфидерной или квадрифидерной запиткой обычно имеют *AR* –2 дБ или меньше (чем меньше, тем лучше).

Положение низкоорбитальных КА постоянно меняется во времени. При этом функциями времени являются как их азимутальные ϕ , так и угловые θ координаты в сферической системе координат, связанной с потребителем навигационной системы. Таким образом, потенциальный источник сигнала может иметь произвольный азимутальный угол в пределах от 0 до 360° и угол места в пределах от 0 до 90° [4].

Исходя из этого, можно сформулировать первое требование к диаграмме направленности (ДН) антенны, которая в идеальном случае должна иметь полусферическую форму. Можно заметить, что антенна с такой ДН обеспечивает одинаковые условия приема сигналов для всех спутников, находящихся в данный момент над точкой приема.

Особенностью уже разработанных и проектируемых глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) является использование для передачи сигналов правой круговой поляризации. Волны круговой поляризации удобно принимать потребителю, положение которого в пространстве по отношению к источнику излучения может быть произвольным. По этой причине при создании навигационных систем предпочтение было отдано волнам круговой поляризации.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что антенна приемника должна быть антенной с круговой поляризацией. Поляризационные свойства антенн описываются с помощью коэффициента эллиптичности (КЭ). Для идеальной антенны с круговой поляризацией он равен единице. КЭ зависит от угловых координат. Поэтому его величина не должна быть меньше некоторого допустимого значения углов

$$\begin{aligned} 0 < \phi < 360^\circ; \\ 0 < \theta < 90^\circ. \end{aligned} \tag{1}$$

КЭ является функцией частоты и, следовательно, он не должен опускаться ниже предельного значения в рабочей полосе частот Δf . Следует отметить, что контролировать величину КЭ в секторе углов (1) весьма затруднительно. Поэтому на практике к антеннам СН предъявляются требования по КЭ только в одном направлении, которое задается углом, равным нулю. Обычно в этом направлении ДН имеет максимум. В качестве предельного уровня КЭ берется значение равное 0,707. Выраженное в децибелах оно равно -3 дБ.

Отметим, что обеспечить большой уровень КЭ во всем диапазоне углов (1) почти нереально. Особенно это относится к углам θ , близким к 90° , когда волна распространяется вдоль поверхности Земли. Следует отметить, что падение КЭ до нуля не означает, что невозможно получить круговую волну поляризации. Однако это происходит при ослаблении другого важного параметра антенны — коэффициента усиления (КУ). Уменьшение предельной КУ при уменьшении КЭ до нуля составляет -3 дБ. Ухудшение КУ из-за ухудшения поляризационных характеристик также называется поляризационными потерями, максимальная величина которых составляет 3 дБ. КУ является важным параметром антенны, который во многом определяет свойства всей системы в целом. Из теории ан-

тени известно, что КУ антенны G можно представить в виде произведения ее коэффициента направленного действия (КНД) D и коэффициента полезного действия (КПД) η

$$G = D \cdot \eta.$$

Возьмем в расчет, что этот параметр полностью определяется ДН антенны. Идеальная антенна СН имеет КНД равный 3 дБ [4]. Увеличить его невозможно при выполнении требований к ДН, которые сформулированы выше. На практике он оказывается выше значения 3 дБ, так как ДН реальной антенны уменьшается при углах θ , близких к 90° . Так или иначе, дальнейшее увеличение КУ из-за изменения шаблона невозможно, так как это может уменьшить количество спутников, от которых потребитель получает сигналы.

3. Результаты моделирования

Для проектирования шлейфного квадратного моста использовался пакет программ *AWR Design Environment* 13.

Квадратурный мост является четырехпортовой структурой. Выполненной из четырех отрезков проводников длиной $\lambda/4$. Так как микрополосковые проводники имеют конечную ширину, то около портов наблюдается перекрытие двух МПЛ, присоединяемых к данному порту. Электромагнитное поле в области перекрытия отличается от такового в неперекрывающихся отрезках МПЛ, что не учитывалось при теоретическом анализе этого МУ, так как поле в отрезках принимается однородным по всей их длине. Чтобы уменьшить влияние данного несоответствия, надо минимизировать размеры области перекрытия. Для этого длина отрезка МПЛ должна быть значительно больше, чем его ширина. Это условие можно выполнить, если использовать подложку с малой толщиной, так как эффективная диэлектрическая проницаемость слабо зависит от ее толщины, и поэтому длина отрезка МПЛ тоже будет мало зависеть от толщины [5, 6].

Модель шлейфного квадратного моста показана на рис. 3а, топология квадратного моста — на рис. 3б.

Результатом моделирования схемы квадратного моста в *AWR Design Environment* являются параметры матрицы рассеяния. На рис. 4 представлен график S -параметров в необходимой рабочей полосе частот для разрабатываемой микрополосковой антенны [7].

Из графиков можно сделать вывод о том, что полученная модель моста удовлетворяет всем необходимым требованиям. Коэффициент отражения от входов на необходимой частоте 1,242 ГГц не превышает 0,013. Размер топологии удовлетворяет размерам МПА, для которой он был спроектирован.

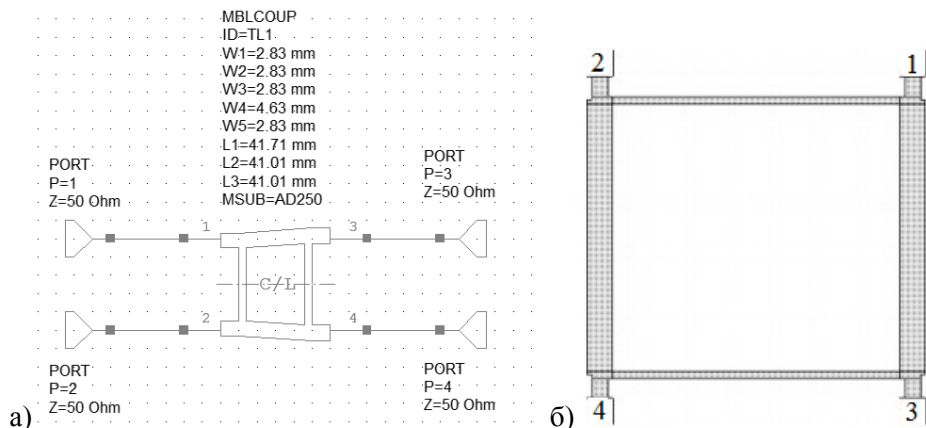


Рис. 3. Вид модели шлейфного квадратурного моста (а) и топология квадратурного моста (б).

Fig. 3. Model view of the stub quadrature bridge (a) and topology of the quadrature bridge (b)

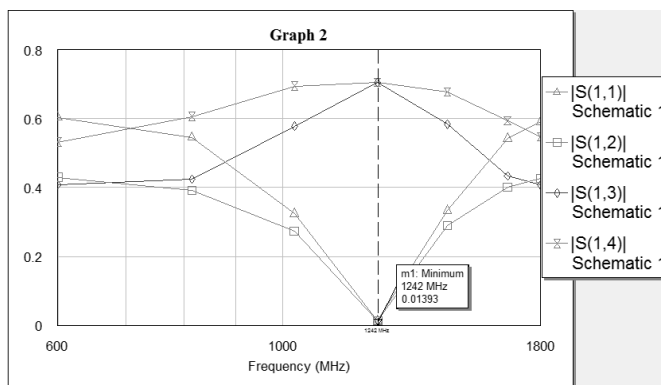


Рис. 4. Графики S-параметров на частоте 1,242 ГГц.

Fig. 4. S-parameter graphs at 1.242 GHz

МПА состоит из пяти слоев: слой квадратурного моста, диэлектрический слой подложки для моста, экран, диэлектрический слой подложки для излучателя и излучатель. Излучатель связан с источником радиочастоты через металлические штыри с квадратурным мостом, а мост уже непосредственно с коаксиальной линией. Так как излучатель — идеальный проводник, на его поверхности нет тангенциального электрического поля. Кроме того, хотя излучатель открыт по краям, это не идеальная разомкнутая цепь, поскольку диэлектрическая подложка очень тонкая по сравнению с длиной волны на рабочей частоте. Таким образом, апертура излучения больше физической апертуры.

Параметры подложки были выбраны в соответствии с техническими требованиями и, учитывая особенности технологии изготовления подобных элементов, были рассчитаны геометрические размеры излучающего элемента. Размеры экрана были выбраны из соображений использования микрополосковой антенны [8, 9].

Размеры диэлектрической подложки для квадратурного моста были подобраны таким образом, чтобы возможно было спроектировать и смоделировать шлейфный квадратурный мост.

Результат моделирования 3-х слоев антенны — излучателя, основания и экрана — показаны на рис. 5а. Проектирование 2-х слоев антенны — диэлектрика и квадратурного моста показаны на рис. 5б.

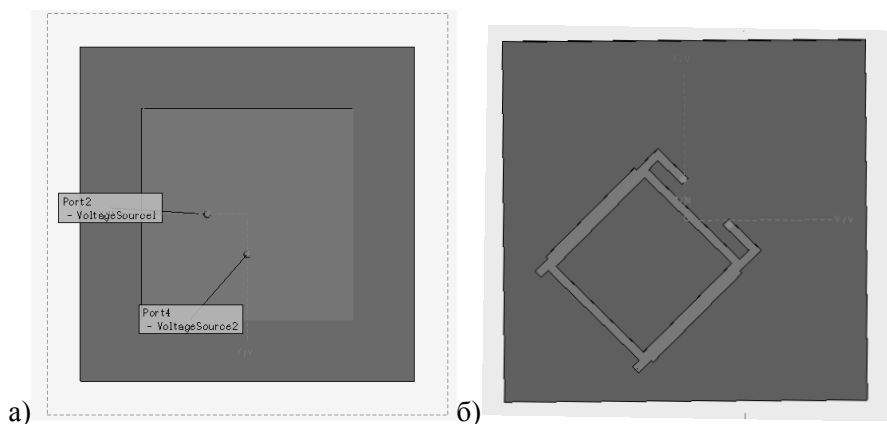


Рис. 5. Вид модели квадратной МПА (а); вид модели квадратурного моста (б).

Fig. 5. Type of model square MSA (a); model view of a quadrature bridge (b)

Питание антенны, как говорилось выше, осуществляется коаксиальным кабелем. Коаксиальный кабель подводится к шлейфному квадратурному мосту, который соединен металлическим стержнем с излучателем. Стержень проходит от квадратурного моста сквозь диэлектрик — заземленный слой — диэлектрик до излучателя. Импеданс можно отрегулировать путем правильного размещения металлического стержня. Когда расстояние точки питания от края излучателя увеличивается, входной импеданс, в целом, уменьшается.

На рис. 5 под именами *Port2* и *Port4* показаны встроенные порты питания в плоскости *XY*.

Для проверки электрических характеристик разработанной МПА получены результаты электромагнитного моделирования с помощью программного обеспечения *CADFEKO*.

Моделирование проводилось в диапазоне 1—1,4 ГГц, центральная частота составляет 1,242 ГГц, которая может обеспечить обратное излучение не более -18 дБ, что отображено на рисунках 6а и 6б. Из рисунков видно, что графики идентичны и имеют почти одинаковые параметры: коэффициент отражения для 1-го порта равен $-18,42$ дБ, для второго порта $-18,71$ дБ.

Для обеспечения приемлемого КПД значения КСВ лежат в пределах от 1,0—2,0. В результате моделирования нашей МПА на центральной частоте получили значение КСВ равно 1,31. Результат расчета зависимости КСВ входа антенны от частоты изображен на рис. 7.

Диапазон рабочих частот антенны по уровню VSWR не более 2,0, составляет от 1,213 ГГц до 1,25 ГГц.

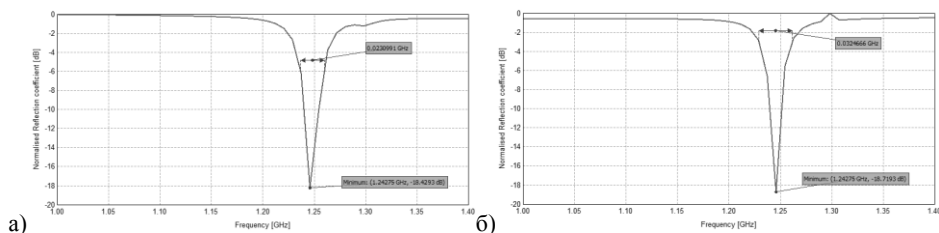


Рис. 6. Результат расчета частотной зависимости коэффициента отражения для 1-го порта (а) и для 2-го порта (б).

Fig. 6. The result of calculating the frequency dependence of the reflection coefficient for the 1st port (a) and for the 2nd port (b)

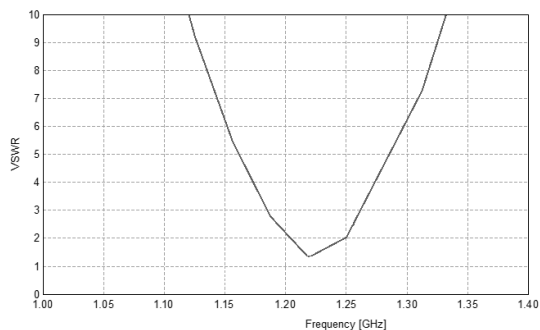


Рис. 7. Результат расчета зависимости КСВ входа антенны от частоты.

Fig. 7. The result of calculating the dependence of the SWR antenna input on frequency

Наиболее важной характеристикой антенны является излучение дальнего поля. 3D-график направленности антенны показан на рис. 8.

Представлены следующие характеристики антенны: пиковая направленность равна 7,18 дБ, ширина ДН по уровню 3 дБ — 85° , уровень заднего лепестка равен $-9,62$ дБ.

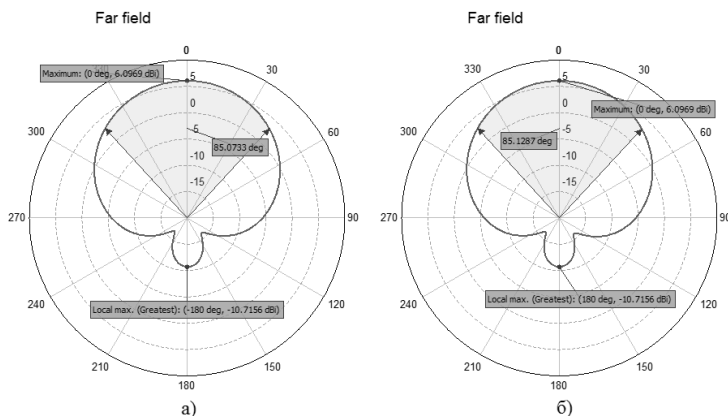


Рис. 8. Результат расчета ДН антенны: при $\varphi = 0^\circ$ (а), при $\varphi = 90^\circ$ (б).

Fig. 8. The result of calculating the antenna bottom: for $\varphi = 0^\circ$ (a), for $\varphi = 90^\circ$ (b)

Для оценки поляризационных свойств антенн используется коэффициент эллиптичности. Результат расчета коэффициента эллиптичности изображен на рис. 9.

Из рис. 9 можно сделать вывод о том, что коэффициент эллиптичности максимален в 0° и составляет 0,98. Такое значение соответствует правой круговой поляризации.

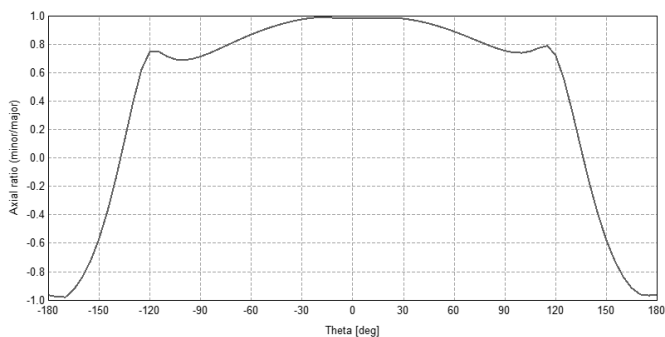


Рис. 9. Результат расчета коэффициента эллиптичности антенны.

Fig. 9. The result of calculating the ellipticity coefficient of the antenna

4. Заключение

В результате проведенного обзора литературы по ГНСС ГЛОНАСС и GPS выявлены основные погрешности местоопределения, а также выбран метод борьбы с многолучевостью путем использования микрополосковой антенны круговой поляризации.

На основе рассмотренных принципов построения микрополосковых антенн была разработана микрополосковая антенна правой круговой поляризации. Выполнен расчет антенны и моделирование ее характеристик в программной среде *CADFEKO*.

В результате моделирования антенны были получены следующие характеристики:

- центральная частота 1,242 ГГц;
- значение КСВ на центральной частоте составляет 1,31;
- коэффициенты отражения портов не менее –18,5 дБ;
- диапазон рабочих частот: от 1,213 до 1,25 ГГц;
- коэффициент усиления — 6,09 дБ;
- коэффициент эллиптичности антенны составляет 0,98, что соответствует правой круговой поляризации.

Список литературы

1. ИКД ГЛОНАСС. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ / ИКД ГЛОНАСС. — М. : ИКД ГЛОНАСС, 2008. — 60 с.
2. Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. — М. : Горячая линия-Телеком, 2007. — 272 с.
3. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К. М. Антонович. — М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2010. — 320 с.
4. Банков, С. Е. Антенны спутниковых навигаторов / С. Е. Банков. — М. : Издательство «Перо», 2014. — 693 с.
5. Balanis, C. Antenna Theory (3rd Edition) / C. Balanis. — Б. м., Wiley, 2005. — 1073 p.
6. Johnson, R. Antenna Engineering Handbook / R. Johnson. — Б. м., McGraw-Hill, 1993. — 1512 p.
7. Шаров, Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн / Г. А. Шаров. — М. : Горячая линия-Телеком, 2016. — 640 с.
8. Панченко, Б. А. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Нефёдов. — М. : Радио и связь, 1986. — 144 с.
9. Лавренко, Б. Е. Компьютерное проектирование устройств СВЧ : учеб. пособие. / Б. Е. Лавренко, В. Н. Малышев. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. — 120 с.

Информация об авторах

Дурманов Максим Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Севастопольского государственного университета, Российская Федерация.

Бобошко Александр Владимирович, выпускник кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Севастопольского государственного университета, Российская Федерация.

Information about the authors

Maksim A. Durmanov, Senior Lecturer of the Department of Radioelectronics and Telecommunications of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Aleksandr V. Boboshko, graduate of the Department of Radioelectronics and Telecommunications of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.382

Изготовление и исследование молекулярного одноэлектронного транзистора¹

^{1,2} Морозова Е. К., ^{1,2} Лялина А. М., ^{1,2} Сапков И. В.,
¹ Белоглазкина Е. К., ^{1,2} Солдатов Е. С.

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
г. Москва, 119991, Российская Федерация

² Центр квантовых технологий МГУ имени М.В. Ломоносова
esold@phys.msu.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Изготовлен тонкопленочный молекулярный одноэлектронный транзистор с молекулой аурофильного производного терпидина на основе атома Rh. Разработана методика изоляции боковых затворов транзистора, показано, что сопротивление изоляции затвора превышает 1 ТОм , что надежно обеспечивает полевой характер воздействия управляющего электрода на остров транзистора. Измерения вольтамперных характеристик изготовленных транзисторов при $T=77,4\text{ К}$ показали, что они обладают блокадными участками $500\text{—}800\text{ мВ}$, что указывает на коррелированный (одноэлектронный) характер транспорта электронов в полученном транзисторе и формирование, учитывая строение используемой молекулы, атомно-го одноэлектронного транзистора на основе одиночного атома родия.

Ключевые слова: одноэлектронное туннелирование, молекулы, нанолитография, наноструктуры, нанотранзистор, нанoeлектроника, молекулярная электроника.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Морозова Е. К., Лялина А. М., Сапков И. В., Белоглазкина Е. К., Солдатов Е. С. Изготовление и исследование молекулярного одноэлектронного транзистора // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 204—215.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Морозова, Е. К. Изготовление и исследование молекулярного одноэлектронного транзистора / Морозова Е. К., Лялина А. М., Сапков И. В., Белоглазкина Е. К., Солдатов Е. С. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 204—215.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Production and research of a molecular single-electron transistor

E. K. Morozova^{1,2}, A. M. Lyalina^{1,2}, I. V. Sapkov^{1,2},
E. K. Beloglazkina¹, and E. S. Soldatov^{1,2}

¹ Moscow State University n. a. M. V. Lomonosov, Moscow, 119991, Russia

² The Center for Quantum Technologies of M. V. Lomonosov Moscow State University
esold@phys.msu.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: A thin-film single-electron molecular transistor with a molecule an aurophilic derivative of terpyridine based on the Rh atom was manufactured. A technique has been developed for isolating the side gates of the transistor, it is shown that the insulation resistance of the gate exceeds $1T$, which reliably provides the field effect of the control electrode on the island of the transistor. Measurements of the current-voltage characteristics of the fabricated transistors at $T=77.4$ K showed that they have Coulomb blockade sections of 500–800 mV, which indicates a correlated (single-electron) nature of the electron transport in the resulting transistor and the formation, taking into account the structure of the molecule used, of a single-electron atomic transistor based on single atom of rhodium.

Keywords: single-electron tunneling, molecules, nanolithography, nanostructures, nanotransistor, nanoelectronics, molecular electronics.

For citation (IEEE): E. K. Morozova et al. “Production and research of a molecular single-electron transistor,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 204–215. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.19

1. Введение

Одним из перспективных устройств нового поколения нанoeлектроники является одноэлектронный транзистор, который представляет собой систему из зарядового центра, сопряженного с электродами истока и стока туннельными переходами предельно малой емкости. Туннелирование электронов через такую систему происходит коррелировано и принцип работы такого нанoeлемента основан на явлениях коррелированного туннелирования электронов и кулоновской блокады [1]. Такие элементы обладают целым рядом уникальных свойств, область возможных примене-

ний таких транзисторов чрезвычайно широка: от точнейших измерительных приборов до квантового компьютера и квантового клеточного автомата. Они могут обеспечить создание принципиально новых вариантов различных устройств от уникальных сенсоров до ЭВМ нового типа [2]. Однако их широкое использование сталкивается с проблемой чрезвычайно низкой рабочей температуры таких транзисторов с центральным электродом/зарядовым центром (часто называемым «островом»), изготовленным традиционными методами нанолитографии [2]. Высокотемпературные ($T > 77$ К) одноэлектронные транзисторы должны иметь характерный размер «острова» около 3—5 нм [1], что практически невозможно обеспечить с помощью даже самой современной нанолитографии. Выходом в этой ситуации может быть вариант транзистора, когда в качестве его «острова» используются молекула или малая наночастица. Молекулярный одноэлектронный транзистор является весьма перспективным направлением развития современной электроники [2]. При этом, если для формирования «острова» транзистора выбрать молекулы, обладающие единственным атомарным зарядовым центром, такие, как молекулы ауофильного производного терпиридина на основе родия $\text{Rh}(\text{tpy}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(\text{O})-(\text{CH}_2)_4-\text{C}_3\text{H}_5\text{S}_2)_2$ [3] с зарядовым центром в виде одиночного атома родия, то, по сути, это приведет к формированию на базе такой молекулы атомного одноэлектронного транзистора.

Цель настоящей работы — разработать методику создания молекулярных одноэлектронных транзисторов, изготовить образцы таких нанoelementов и провести тестирование их основных характеристик. Для осуществления поставленной цели необходимо изготовить на кремниевой подложке методами оптической и электронно-лучевой литографии систему нанoelectродов транзистора, измерить характеристики полученных электродов молекулярных транзисторов, сформировать молекулярные одноэлектронные транзисторы путем встраивания «острова»-молекулы между электродами и измерить характеристики транзисторов.

2. Изготовление электродной системы

Для изготовления транзистора использовались стандартные кремниевые пластины диаметром 75 мм. Для исключения влияния электрической проводимости полупроводниковой пластины на их поверхность наносился слой изолятора (оксид кремния (SiO_2) толщиной 400 нм) путем магнетронного напыления в установке Leybold Z-400 в смеси газов кислорода и аргона при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ и $2 \cdot 10^{-3}$ мбар кислорода и аргона соответ-

ственно. После этого подложка с нанесенным изолятором разрезалась на квадратные чипы со стороной 10 мм.

Затем методами оптической литографии на чипе формировалась макроскопическая система подводящих проводов. Для этого на него методом центрифугирования наносился слой чувствительного к излучению полимерного резиста. В данной работе использован позитивный резист РММА А4 (4 % раствор в анизоле), чувствительный как к ультрафиолетовому, так и электронно-лучевому облучению. Он наносился на подложку в виде капли резиста и последующей раскрутке чипа на центрифуге. Варьируя время и скорости вращения центрифуги можно получать слой резиста различной толщины. При скорости 4000 об/мин и времени вращения 60 секунд получается слой толщиной 200 нм. Затем для полимеризации образец высушивался при температуре 180° С на протяжении 10 минут. После этого с помощью кварцевой ультрафиолетовой лампы ДРК-120 область подводящих проводов на чипе облучается через фотошаблон излучением с длиной волны 254 нм при интенсивности 26—27 мВ/см² в течение 2 минут. После проявления при комнатной температуре в течение 50 секунд в смеси изопропилового спирта и воды с отношением 7 % и 93 % соответственно образец, с которого при проявлении удаляется резист из тех мест, где он был облучен при формировании «окон» для будущих подводящих проводов (черный цвет на рис. 1), чистится на центрифуге с помощью изопропилового спирта и сушится.

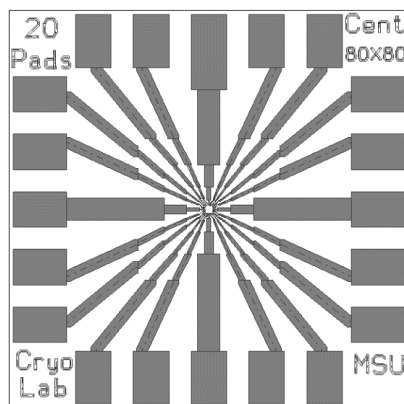


Рис. 1. Общий вид системы электродов на чипе.

Fig. 1. General view of the system of electrodes on a chip

Таким образом, формируется маска для формирования подводящих электродов к центральной части образца, размер которой 80×80 мкм. По-

сле этого необходимо проэкспонировать центральную часть образца (белая область в центре чипа на рис. 1), где и будет сформирована система нанoeлектронов транзистора (рис. 2).

С помощью оптической литографии невозможно обеспечить формирование нанопровода с размером в самом узком месте около 40 нм [11], который необходим для получения молекулярного транзистора на основе именно одиночной молекулы. Поэтому экспонирование центральной части образца происходит с помощью электронно-лучевой литографии, которая сейчас имеет самую высокую разрешающую способность: с ее помощью можно получать структуры нанометровых масштабов. Этот процесс реализовывался в данной работе с помощью электронного микроскопа ZEISS Supra 40 с дополнительным модулем Raith для проведения процесса литографии. Засвечивание проводилось с шагом 2 нм при апертуре 7.5 мкм, ускоряющем электроны напряжении 20 кВ.

После экспонирования в электронном микроскопе проводился процесс проявления при тех же параметрах, что и после оптической литографии. В образовавшиеся «окна» теперь необходимо нанести материал электродов, в качестве которого для изготовления молекулярных электронных элементов чаще всего используется золото из-за отсутствия у него естественных окислов. Нанесение золота проводилось методом термического напыления в установке Leybold L-560 при давлении не выше, чем 10^{-6} мбар. В качестве буферного слоя для адгезии золота были использован титан. В результате на подложку наносились 1 нм буферного слоя и 18 нм золота. Заключительным шагом в формировании наноструктуры является удаление маски из необлученного резиста вместе с напыленным материалом, лежащим на ней. Эта процедура называется «взрыв» или «lift-off», в ходе которой образец помещается в бокс с ацетоном, а сам бокс — в ультразвуковую ванну. После удаления маски на образце остается только то золото, которое легло в свободные от резиста области, формируя наноструктуру. Таким образом удастся создать систему подводящих проводов, управляющих электродов и нанопроводов (рис. 2а, б).

Чтобы обеспечить эффективное управление туннельным током однопроводных транзисторов, необходимо разработать технологию изготовления транзисторов с максимально приближенными к острову транзистора электродами затвора для увеличения их взаимной емкости, что позволит обеспечить такую их эффективность, которая необходима для регистрации осциллирующего вида характеристик управления в такой уникальной системе. Для этого в данной работе была разработана новая топология электродов транзистора с увеличенным вдвое количеством электро-

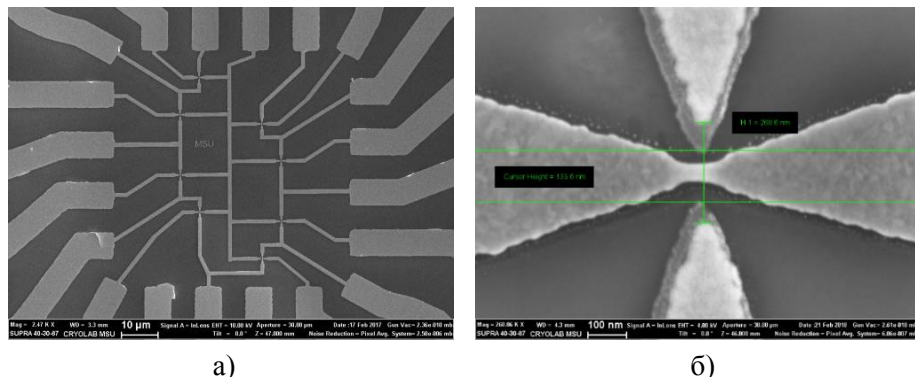


Рис. 2. Система нанoeлектродов транзистора: а — общий вид системы нанoeлектродов транзисторов в центре образца (белое пятно в центре на рис 1); б — вид нанопровода перед операцией разрыва (наверху — затвор).

Fig. 2. Nanoelectrode system of the transistor: a – general view of the system of nanoelectrodes of transistors in the center of the sample (white spot in the center in Fig. 1); b – the shape of the nanowire before the rupture operation (at the top – the gate)

дов затвора и с уменьшенным до 100 нм расстоянием между двумя затворами, расположенными по разные стороны от нанопровода (рис. 2б). Ее реализация потребовала разработки методики увеличения разрешающей способности рабочего резиста РММА А2 с помощью техники «холодного» проявления [4]. Это позволило за счет уменьшения размеров нанопроводов увеличить их количество на ограниченной области электронного экспонирования, что повышает, однако, требования к изоляции затвора от проводящего острова. Для их выполнения и предотвращения утечки заряда между затвором и электродами была разработана методика изоляции электродов управления путем запылнения электрода затвора толстым слоем диэлектрика через «окно», созданное прямой литографией в слое позитивного резиста. Главной проблемой реализации данного метода в системе с максимально приближенными к «острову» затворами являются повышенные требования к точности совмещения масок и разрешению электронно-лучевой литографии. После формирования на подложке полной системы электродов молекулярного одноэлектронного транзистора по описанной выше методике проводилась еще одна электронно-лучевая литография в позитивном резисте РММА А2 с «окнами» над электродами затвора, которые надо было предельно аккуратно совместить с уже сформированными электродами затвора. Для достижения максимальной точности совмещения маска включала специальные маркеры и точность процесса совмещения была улучшена до 15-20 нм (рис.2б). После этого на всю наноструктуру

ру напылялся слой оксида алюминия (Al_2O_3) толщиной 30 нм и удалялись все неэкспонированные участки резиста (производился «lift-off»). В результате получалась наноструктура, в которой пленка оксида алюминия полностью изолирует затвор, не затрагивая нанопровода (рис. 2б), для чего и требовалась высокая точность совмещения маски затвора с самим затвором, учитывая необходимость максимальной близости боковых затворов к нанопроводу. Полученный результат показывает достижение весьма высокой точности совмещения — около 20 нм.

Для проверки качества полученной изоляции электродов управления между электродом затвора и транспортным электродом измерялся ток утечки при подаче напряжения до 50 В. Измерения утечки между затвором и проводящим электродом показали, что сопротивление утечки превышает 1 ТОм (рис.3).

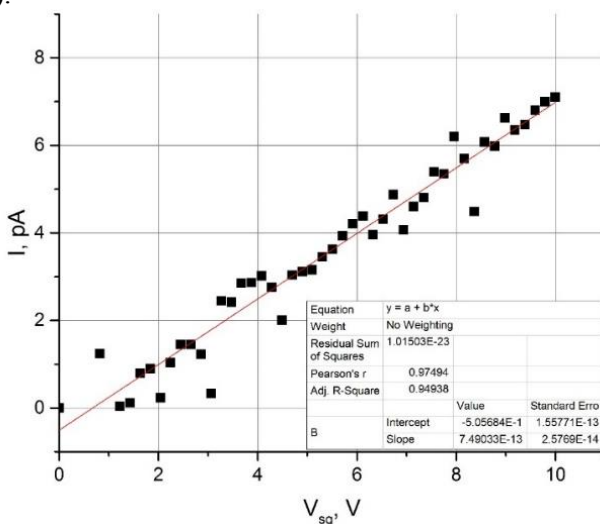


Рис. 3. Вольтамперная характеристика тока утечки.

Fig. 3. I-V curve of leakage current

Такое сопротивление было зарегистрировано для всех образцов, что показывает пригодность изготовленных наноструктур электродов для корректного измерения всех характеристик молекулярных одноэлектронных транзисторов.

4. Формирование транзисторов и их характеристики

Заключительным шагом на пути к созданию одноэлектронного транзистора является формирования изолированного «острова» между элек-

тродами транзистора. В данной работе для формирования «острова» транзистора были использованы молекулы аурофильного производного терпидина на основе родия $\text{Rh}(\text{tpy}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(\text{O})-(\text{CH}_2)_4-\text{C}_3\text{H}_5\text{S}_2)_2$ [3], имеющие длину 4,7 нм.

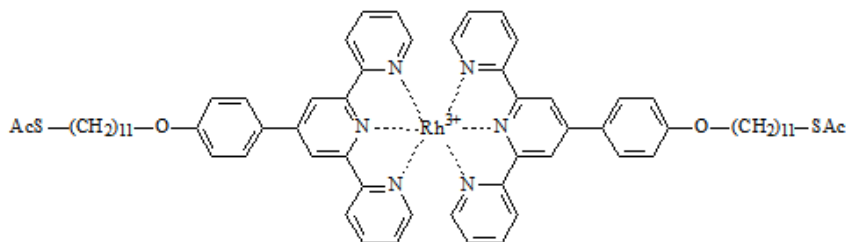


Рис. 4. Структурная формула молекулы аурофильного производного терпидина на основе родия [3].

Fig. 4. The structural formula of the molecule of the aurophilic derivative of terpyridine based on rhodium [3]

Эти молекулы обладают единственным зарядовым центром в виде одиночного атома родия, что создает возможность сформировать на базе такой молекулы атомный одноэлектронный транзистор. Привлекательность таких молекул с технологической точки зрения связана с наличием на обоих концах молекулы аурофильной тиольной группы, обеспечивающей прочную молекулярную (ковалентную) связь между молекулой и нанoeлектродом транзистора, сделанного из золота, что обеспечивает высокую непосредственную проводимость контакта молекулы с электродами и большую механическую прочность и стабильность изготовленной системы.

В данной работе встраивание молекул в транзистор проводилось путем помещения образца на 12 часов в раствор молекул в диметилформамиде (ДМФА) с концентрацией 10^{-3} моль/л для осаждения их на изготовленный нанопровод, в котором после этого с помощью эффекта электромиграции [5] формировался нанозазор между электродами истока и стока транзистора. Для того, чтобы одноэлектронный транзистор работал при высокой, вплоть до комнатной, температуре, необходима предельно малая емкость и, следовательно, размеры его «острова» (не более 3—4 нм для достижения комнатной температуры). Для формирования молекулярного одноэлектронного транзистора необходимо в предельно узкий зазор между электродами истока и стока поместить такой «остров»-молекулу. Зазор столь малой ширины чрезвычайно трудно получить методами стандартной

нанолитографии, даже электронно-лучевой, однако такая задача может быть решена путем использования эффекта электромиграции.

Электромиграция — это явление увеличения подвижности атомов кристаллической решетки под влиянием протекания по проводнику электрического тока, приводящего в пределе большой плотности тока к перемещению атомов. Это при продолжающемся разогреве током вызывает образование сужения нанопровода, из-за чего плотность тока на этом участке возрастает и т. д., что в итоге приводит к разрыву нанопровода. Процесс имеет лавинообразный характер и для контролируемого формирования нанозазоров требует своевременной остановки. В работе [6] была разработана автоматизированная программа для контролируемого проведения процесса электромиграции с помощью системы сбора экспериментальных данных ADwin Gold, которая была использована в данной работе и использование которой позволило обеспечить стабильное получение зазоров размером 2–4 нм в более чем 90 % случаев.

Идея встраивания молекулы состоит в том, что при разрыве нанопровода с осажденным на нем плотным монослоем молекул ближайшая к краю образовавшегося зазора молекула замкнет этот зазор при его ширине менее ~4 нм (длина молекулы 4,7 нм [3]). Таким образом, молекула изначально, с момента образования зазора, будет замыкать золотые транспортные электроды транзистора. Эксперименты показали, что замыкание нанозазора, которое диагностировалось по появлению отличной от нуля проводимости в начале координат на его вольтамперной характеристике, наблюдалось примерно у 30 % образовавшихся в результате электромиграции нанозазоров. Этот достаточно высокий выход годных образцов показывает, что такой способ встраивания молекул между электродами вполне пригоден для дальнейшего использования в технике изготовления молекулярных одноэлектронных транзисторов.

Измерения вольтамперных характеристик изготовленных по описанной выше методике молекулярных одноэлектронных транзисторов осуществлялись с помощью измерительного стенда на основе прецизионного пикоамперметра Keithley 6487 при температуре, соответствующей кипению жидкого азота, а именно 77,4 К. Такие условия были выбраны для подавления тепловых флуктуаций, к которым чрезвычайно чувствительны одноэлектронные системы [Лих] и четкой регистрации режима кулоновской блокады туннелирования электронов и их коррелированного транспорта в транзисторе. При этом на характеристиках транзисторов наблюдался четко выраженный участок кулоновской блокады с нулевой проводимостью размером 500–800 мВ (рис. 5), что соответству-

ет ожидаемым значениям этого параметра для зарядового центра атомарного размера [7].

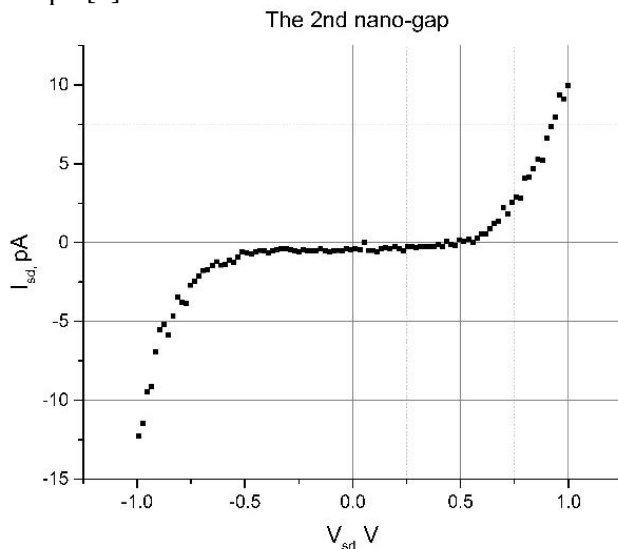


Рис. 5. Типичная вольтамперная характеристика изготовленных молекулярных транзисторов при $T=77$ K.

Fig. 5. A typical current-voltage characteristic of fabricated molecular transistors at $T=77$ K

Такие значения характерного напряжения блокады соответствуют значениям зарядовой энергии более 250 мэВ, которые гораздо выше энергии тепловых флуктуаций при комнатной температуре (~ 26 мэВ), что обеспечивает возможность наблюдать и использовать одноэлектронное туннелирование в таких нанозементах также и при комнатной температуре.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе разработана методика формирования тонкопленочной системы электродов, специализированной для изготовления молекулярных нанотранзисторов и изготовлены молекулярные одноэлектронные транзисторы на основе одиночных молекул аурофильного производного терпиридина на основе родия. Разработана и реализована методика приближения боковых электродов затвора к нанопроводу и их надежной изоляции с сопротивлением утечки более 1 Том, что обеспечивает повышение эффективности влияния поля затвора на туннельный ток через транзистор. Использование для формирования транзистора молекул аурофильного производного терпиридина на основе родия обеспечило

формирование, по сути, атомных одноэлектронных транзисторов, т.к. транспорт электронов через созданные молекулярные транзисторы, имеющий, как показывают измеренные ВАХ, одноэлектронный характер, определяется одноатомным зарядовым центром. Полученные значения напряжения блокады и, соответственно, зарядовой энергии транзисторов согласуются с ожидаемыми для одноатомных транзисторов и обеспечивают возможность изготовления одноатомных транзисторов и устройств на их основе, работоспособных при комнатной температуре.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа была выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант № 19-07-01091).

Список литературы

1. Averin D. V. and Likharev K. K. Single-electronics : Correlated transfer of single electrons and Cooper pairs in small tunnel junctions // *Mesoscopic Phenomena in Solids*, 1991. Т. 30. С. 173.
2. Likharev K. K. Single-electron devices and their applications // *Proceedings of the IEEE*. 1999. Т. 87, № 4. С. 606.
3. Beloglazkina E. K., Majouga A. G., Manzheliy E. A. et al. Mononuclear ruthenium(II) and rhodium(III) complexes with S-[4-(2,2':6',2''-terpyridin-4'-yl)phenoxy]butyl ethanethioate and 4'-[4-(1,2-dithiolane-3-yl)butylcarboxy]phenyl]-2,2':6',2''-terpyridine : Synthesis, electrochemistry, antibacterial activity and catalytical application // *Polyhedron*, 2015. Т. 85. С. 800—808.
4. Hu W. et al. Sub-10 nm electron beam lithography using cold development of poly (methylmethacrylate) // *J. Vac. Sci. & Tech. B*. 2004. V. 22. № 4. P. 1711.
5. Park H. et al. Fabrication of metallic electrodes with nanometer separation by electromigration // *Applied Physics Letters*. 1999. Т. 75. № 2. С. 301—303.
6. Dagesyan S. A., Stepanov A. S., Soldatov E. S. et al. Properties of Extremely Narrow Gaps Between Electrodes of a Molecular Transistor // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2015. Т. 28. С. 787—790.
7. Parshintsev A. A., Shorokhov V. V., Soldatov E. S. Study possibility of building a single-electron transistor based on a molecule with single atom charge center // *Bull. Russ. Acad. Sci. Physics*. 2017. Т. 81, № 1. С. 38.

Информация об авторах

Морозова Елизавета Константиновна, студентка Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация.

Лялина Анна Максимовна, студентка Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация.

Белоглазкина Елена Кимовна, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация.

Сапков Иван Владимирович, младший научный сотрудник Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация.

Солдатов Евгений Сергеевич, старший научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Elizaveta K. Morozova, student of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Anna M. Lyalina, student of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Elena K. Beloglazkina, professor of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Ivan V. Sapkov, junior scientific researcher of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Eugene S. Soldatov, senior scientific researcher of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

УДК 53.043

Исследование кристаллов $\text{AuNi/n-p}^+\text{-GaN}$ диодов Шоттки методами атомно-силовой микроскопии¹

^{1,2,3} Торхов Н. А., ² Новиков В. А.

¹ Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов
Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А

² Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 36

³ Томский университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
trkf@mail.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: С использованием метода зонда Кельвина АСМ экспериментально подтверждено наличие составляющей E^* электростатического поля периферии E_p , оказывающего значительное влияние на электростатическую систему AuNi/n-GaN контактов Шоттки.

Ключевые слова: нитрид галлия, барьер Шоттки, омический контакт, работа выхода, поверхность, метод зонда Кельвина АСМ, электрическое поле периферии.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Торхов Н. А., Новиков В. А. Исследование кристаллов $\text{AuNi/n-p}^+\text{-GaN}$ диодов Шоттки методами атомно-силовой микроскопии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 216—226.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Торхов, Н. А. Исследование кристаллов $\text{AuNi/n-p}^+\text{-GaN}$ диодов Шоттки методами атомно-силовой микроскопии / Н. А. Торхов, В. А. Новиков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 216—226.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Investigation of AuNi/n-n+-GaN crystals of Schottky diodes by atomic force microscopy

N. A. Torkhov^{1,2,3} and V. A. Novikov²

¹Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices

Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A

²Tomsk State University, Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenina Av. 36

³Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenina Av. 40

e-mail: trkf@mail.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The component of electrostatic field (E^*) of periferia (EI) was found by atomic force microscopy. The E^* has a significant effect on the electrostatic system of AuNi / n-GaN Schottky contacts, that was experimentally confirmed.

Keywords: gallium nitride, Schottky barrier, ohmic contact, work function, surface, KPFM, peripheral electric field.

For citation(IEEE): N. A. Torkhov et al. "Investigation of AuNi/n-n+-GaN crystals of Schottky diodes by atomic force microscopy," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 216–226, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.20

1. Введение

Современные методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяют измерять латеральные неоднородности поверхностных потенциалов, образованных контактами металл — полупроводник (М — П) на субмикронном и наноуровнях. Это позволило прецизионно исследовать электростатическую систему плоских контактов М — П с барьером Шоттки (БШ) на основе Au/n — GaAs и обнаружить зависимость значений работы выхода электронов $A_e = e\varphi_{Au}$ (далее — просто “работа выхода”) с поверхности барьерных Au-контактов от их линейных размеров — диаметров D . Было показано, что зависимость A_e от D обусловлена влиянием встроенного электрического поля периферии $E_l = E_l(D)$, которое изменяется при изменении отношения $\xi = P/S$, где P — периметр, а S — площадь контакта. Было найдено, что для арсенида галлия n-типа проводимости уменьшение диаметра $D < 500$ мкм приводит к уменьшению работы выхода, а для арсенида

галлия р-типа наоборот — к ее увеличению [1, 2]. Подобные эффекты были замечены также для плоских Pt- [3] и RhPt-контактов Шоттки [4], а также для контактов Шоттки на фосфиде индия [5]. В случае отсутствия БШ, например, для структур металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) значение работы выхода электронов из анодного металлического контакта $A_e = \text{Const}$ не зависит от его линейных размеров [1].

Для плоских контактов Шоттки на широкозонных полупроводниках подобные исследования, за исключением единичных работ, например [6], не проводились. АСМ-исследования электрической системы омических контактов (ОК) еще более ограничены. В связи с этим представляет научно-практический интерес проведение исследований электростатической системы контактов М — П на широкозонных полупроводниках таких, например, как нитрид галлия GaN электронного типа проводимости в связи с использованием таких систем в омических и полевых контактах Шоттки мощных нитридгаллиевых СВЧ транзисторах.

2. Методическая часть

Для изготовления планарных кристаллов диодов Шоттки использовалась выращенная на подложке сапфира эпитаксиальная $n\text{-p}^+\text{-GaN}(0001)$ структура. Толщина эпитаксиального слоя $n\text{-GaN}$ концентрацией $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ составляла 180 нм, слоя $p^+\text{-GaN}$ с концентрацией $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ — 5 мкм. Со стороны эпитаксиального слоя $n\text{-GaN}$ методом плазменного травления изготавливались мезы высотой 200 нм. Затем вокруг мез на поверхности высоколегированного слоя $p^+\text{-GaN}$ методом взрывной литографии формировались омические TiAlNiAu-контакты с последующим быстрым термическим отжигом в атмосфере азота при температуре 780 °С. После этого на поверхности эпитаксиального p -слоя мез методом взрывной литографии формировался AuNi-контакт Шоттки диаметром $D_1=5$, $D_2=10$, $D_3=40$, или $D_4=120$ мкм. Толщина Ni составляла 50 нм, Au — 200 нм.

Контроль размеров изготовленных контактов (рис. 1, *a* и *b*) и работы выхода электронов $A_e = e\varphi_{s(m)}$ (1) (рис. 1, *c* и *d*) проводились на атомно-силовом микроскопе (АСМ) “Solver-HV” (производства NT MDT) работающего в двухпроходном режиме метода зонда Кельвина. Влияние элементов конструкции кантилевера на результаты измерений — так называемое приборное влияние, не превышало 2.5 % на расстоянии 5 мкм от контакта и 10 % в непосредственной близости от него.

$$e\varphi_{s(m)} = e\varphi_p - e\Delta\varphi_{s(m)}, \quad (1)$$

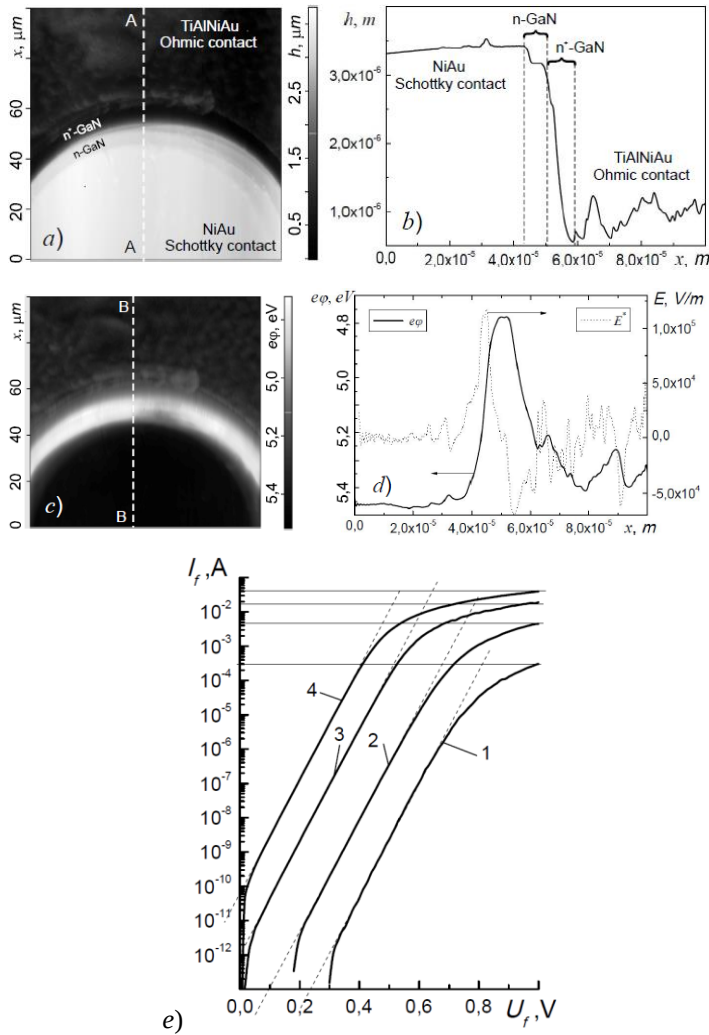


Рис. 1. AFM-изображения участка поверхности AuNi/n-n⁺-GaN кристалла диода Шоттки $D=120 \mu\text{m}$ с окружающим его TiAlNiAu-омическим контактом к n⁺-GaN: рельефа $h(x, y)$ — a), профиля A — A поперечного сечения рельефа $h(x)$ — b), распределения $A_e = e\phi(x, y)$ — c), профиля B — B поперечного сечения $e\phi(x, y)$ — d). Прямые ВАХ диодных AuNi/n-n⁺-GaN кристаллов с диаметрами контактов Шоттки D : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 и 4 — 120 μm — e).

Fig. 1. AFM images of region of the AuNi / n-n⁺ -GaN surface of a Schottky diode crystal $D=120 \mu\text{m}$ with ohmic contact of TiAlNiAu on n⁺-GaN: surface $h(x, y)$ — a), cross-cut A-A of surface $h(x)$ — b), distribution of surface potential $A_e = e\phi(x, y)$ — c), cross-cut B-B of surface potential $e\phi(x, y)$ — d). Forward IV characteristic of AuNi/n-n⁺-GaN crystals with D : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 and 4 — 120 μm — e)

здесь $e=1$ — заряд электрона в системе СГС, $e\phi_p(W_2C)=4.92$ эВ — работа выхода иглы кантилевера (НА-FM/ W_2C) с покрытием из карбида вольфрама W_2C , $\phi_{s(m)}$ — электростатический потенциал (далее — потенциал) исследуемой поверхности полупроводника (s), или металлического контакта (m), $\Delta\phi(x, y)$ — измеряемая АСМ-методом Кельвина контактная разность потенциалов (КРП). Измерения статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных контактов Шоттки проводились на зондовой станции “Cascade-M150” с использованием измерителя электрических характеристик полупроводниковых приборов B1500A производства Keysight Technologies (рис. 1, e).

3. Результаты эксперимента

Полученные результаты АСМ-измерений указывают на то, что несмотря на многослойную конструкцию омического контакта, его поверхностный потенциал практически не отличается от поверхностного потенциала высоколегированного широкозонного полупроводника n^+ -GaN (рис. 1, a, ohmic contact), что соответствует энергетической диаграмме соответствующей диффузионной теории токопереноса в омических контактах. В пользу этого свидетельствует и то, что на границе ОК с материалом n^+ -GaN отсутствует всплеск потенциала. Это указывает на отсутствие потенциального барьера на интерфейсе $TiAlNiAu/n^+$ -GaN. Данный факт находится в противоречии с известным утверждением о том, что перенос подвижных носителей электрических зарядов в $TiAlNiAu/n^+$ -GaN омических контактах происходит по термоэмиссионному механизму через барьер Шоттки с низкой эффективной высотой барьера $\phi_{b,eff}$ [7]. Для окончательного ответа на вопрос о механизмах токопрохождения в $TiAlNiAu/n^+$ -GaN омических контактах, по всей вероятности, необходимо проведение более подробных исследований.

В отличие от поверхностного потенциала ОК поведение поверхностного потенциала плоских $AuNi/n$ -GaN контактов Шоттки заметно отличается от электростатического потенциала окружающей его полупроводниковой поверхности n -GaN. Распределение потенциала исследуемых контактов Шоттки аналогично поведению потенциала плоских Me/n -GaAs контактов Шоттки на арсениде галлия. В частности, из рис. 1, a следует, что работа выхода электронов из металлического контакта на n -GaN также, как и в случае с контактами Шоттки на арсениде галлия значительно превышает работу выхода электронов A_e со свободной полупроводниковой поверхности n -GaN. При этом работа выхода с поверхности металлических контактов на n -GaN так же, как и в случае с плоскими контактами Me/n -GaAs, имеет зависимость от диаметра D . Так, для контактов с диа-

метрами $D \gg 120$ мкм значение работы выхода приближается к значению работы выхода сплошной золотой пленки $e\varphi_{\text{Au}} = e\varphi_{\text{Au}}(\text{film}) = 5.40$ эВ (рис. 2, b). Согласно полученным результатам уменьшение диаметра контактов приводит к уменьшению работы выхода, которая для $D = 5$ мкм составляет уже $e\varphi_{\text{(m)}}(\text{Au}) = 5.14$ эВ (рис. 2, b). За периферией контакта наблюдается переходная область плавно изменяющегося потенциала — “ореол” протяженностью l^* , характерный и для плоских контактов Шоттки на арсениде галлия, а также переходная область внутри периферии — “ореол” протяженностью l_C^* (рис. 2, b).

Согласно [1—3, 8, 10, 11] результирующий вектор встроенного электростатического поля периферии E_l контактов М — П с БШ является суперпозицией вектора постоянного электростатического поля E_{grad} , образованного разностью поверхностных потенциалов металлического контакта и свободной полупроводниковой поверхностью, и зависящего от формы (площади S и периметра P) контакта и направленного противоположно нескомпенсированного вектора электростатического поля E^* :

$$E_l = E_{\text{grad}} + E^*, \text{ а для модулей } |E_l| = |E_{\text{grad}}| - |E^*|. \quad (2)$$

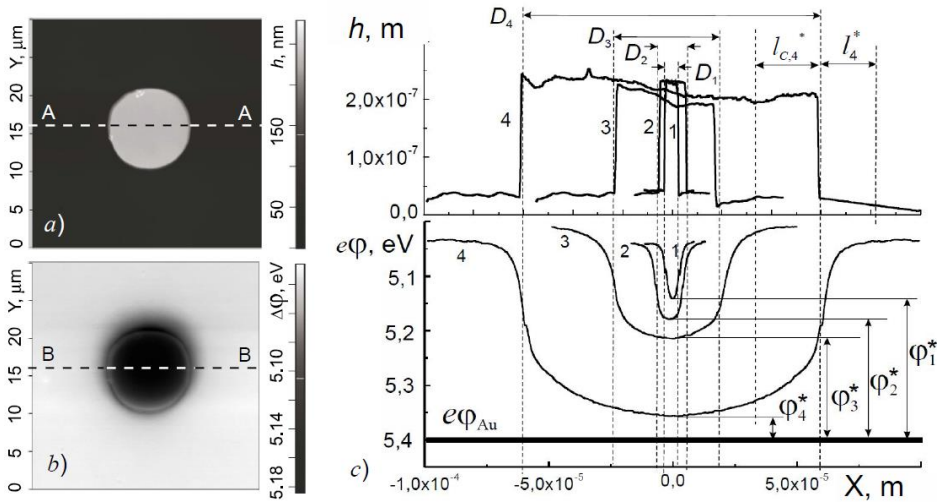


Рис. 2. АСМ-изображение рельефа $h(x,y)$ — а), $A_e = e\varphi(x,y)$ одиночного плоского AuNi/n-GaN контакта Шоттки диаметром $D=10$ мкм — б). Профили поперечных сечений рельефов $h(x,y)$ (А — А) и $A_e = e\varphi(x,y)$ (В — В) AuNi/n-GaN контактов Шоттки диаметрами D : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 и 4 — 120 мкм — с).

Fig. 2. AFM image of surface $h(x,y)$ — a), $A_e = e\varphi(x,y)$ of flat AuNi/n-GaN Schottky diodes with $D=10$ μm — b). Cross-cuts of surface $h(x,y)$ (A—A) and $A_e = e\varphi(x,y)$ AuNi/n-GaN Schottky diodes with D : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 и 4 — 120 μm — c)

Согласно [8, 10, 11] встроенное электрическое поле E_I формирует в области контакта встроенный электростатический потенциал φ^* , который, как было показано выше, может оказывать значительное влияние на работу выхода электронов из металлических контактов Шоттки.

Хорошо видно, что максимум электрического поля E^* приходится именно на периферию выпрямляющего AuNi-контакта. Как видно из рис. 2, b величина $e\varphi^*(E_I)$ (2) легко измеряется и в данном случае в зависимости от диаметра контакта принимает следующие значения: $e\varphi_1^*(D=5 \text{ мкм})=0.26 \text{ эВ}$, $e\varphi_2^*(D=10 \text{ мкм})=0.22 \text{ эВ}$, $e\varphi_3^*(D=40 \text{ мкм})=0.19 \text{ эВ}$ и $e\varphi_4^*(D=120 \text{ мкм})=0.06 \text{ эВ}$. Составляющая E^* электрического поля E_I согласно [8] может быть легко измерена в АСМ-методе Кельвина (рис. 1, d).

Изготовленные NiAu/n-GaN контакты Шоттки имеют классические ВАХ с достаточно хорошими значениями показателя идеальности $n=1.06\text{—}1.1$ и высотой барьера $e\varphi_b=0.93\text{—}0.98 \text{ эВ}$ (рис. 1, e). Это позволяет интерпретировать полученные результаты с использованием известных физических представлений о выпрямляющих контактах металл — полупроводник с барьером Шоттки.

4. Обсуждение результатов

Из [1—3, 8, 10, 11] следует, что форма плоских контактов Шоттки играет важную роль в определении их основных приборных характеристик: токов насыщения I_S , емкостей C , высот потенциальных барьеров φ_b , последовательных сопротивлений R_S и др. Напомним, что плоский контакт Шоттки бесконечной площади $S \rightarrow \infty$ не имеет выпрямляющих характеристик. Значение его R_S стремится к нулю, а значения его I_S и C бесконечны. По этой причине методы вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик не могут быть использованы для нахождения значений их барьеров Шоттки φ_b . Приборные характеристики плоских контактов М — П появляются только после появления у них периметра P и обретения конкретной площади S . Столь значительное влияние периметра на приборные характеристики плоских контактов М — П с БШ заслуживает более подробного рассмотрения.

На возможность влияния периферии плоских контактов М — П с БШ на их электростатическую систему впервые было обращено внимание в монографии Мамедова [9]. В частности, там указывалось на то, что вокруг периметра металлических контактов Шоттки существует дополнительное электрическое поле E_d , образованное разностью поверхностных потенциалов металлического контакта φ_m и свободной полупроводниковой

поверхности φ_s . Согласно [9], вектор напряженности E_d в окружающей контакт области для заданной системы М — П направлен противоположно вектору напряженности электрического поля ОПЗ E_w , а максимальное значение модуля $|E_d| = \text{Const}$ постоянно и никак не связано с формой контактов — ни с их площадью S , ни с их периметром P .

Как следует из [1, 2, 10, 11], наличие E_d по периметру недостаточно для объяснения зависимости поверхностного потенциала плоского контакта Шоттки от его линейных размеров, а также токовой и вольтовой фоточувствительностей [8]. Выше указывалось, что вокруг периметра контактов М — П с БШ, кроме постоянного $|E_{\text{grad}}| = |E_w| = \text{Const}$, существует еще выходящее в полупроводник через боковую поверхность его области пространственного заряда (ОПЗ) и зависящее от площади и периметра контакта некомпенсированное электрическое поле E^* (рис. 2, *c, d* и рис. 3). В данном случае вектор E_{grad} равен по модулю E_d , но сонаправлен с вектором электрического поля ОПЗ E_w (рис. 3, *a, Sch*). В общем случае, для заданной системы М — П максимальное значение $|E_{\text{grad}}| = |E_w|$, а среднее значение $\langle |E_{\text{grad}}| \rangle$:

$$\langle |E_{\text{grad}}(\mathbf{r})| \rangle = \frac{\varphi_{\text{Au, film}} - \varphi_s(x)}{\Delta r}. \quad (3)$$

Вектор E^* , согласно теореме Остроградского — Гаусса, определяется плотностью потока вектора смещения электростатического поля через боковую поверхность ОПЗ [11]. Вне контакта вектор E^* направлен от контакта по нормали к боковой поверхности ОПЗ в сторону убывания потенциала, а в области контакта — по нормали к плоскости контакта противоположно векторам E_w и E_{grad} . Площадь боковой поверхности ОПЗ можно рассчитать как $S^* = W_{\text{Sch}} \times P$, где W_{Sch} — ширина ОПЗ при нулевом смещении на БШ.

Для плоских контактов Шоттки малых площадей ($D < 500$ мкм) при постоянном периметре $P = \text{Const}$ уменьшение площади $S \rightarrow 0$ будет сопровождаться уменьшением электрического заряда Q_w в ОПЗ, что, согласно теореме Остроградского — Гаусса, при неизменной площади боковой поверхности S^* приведет к уменьшению плотности потока вектора смещения электрического поля через боковую поверхность ОПЗ и, соответственно, к уменьшению модуля $|E^*|$, увеличению, согласно (2), $|E_l|$ и увеличению встроенного в контакт электростатического потенциала φ^* . Согласно рис. 2, *c* это приведет к уменьшению работы выхода электронов A_e с Au-поверхности AuNi-контактов Шоттки.

И наоборот, при постоянной площади контакта $S = \text{Const}$ и уменьшающемся периметре $P \rightarrow 0$ заряд Q_w остается постоянным, а площадь боко-

вой поверхности ОПЗ будет уменьшаться. В этом случае плотность потока вектора смещения электрического поля через боковую поверхность ОПЗ будет увеличиваться, что приведет к увеличению модуля $|E^*|$, уменьшению $|E_l|$ и, согласно (2), уменьшению встроенного потенциала φ^* [10]. Согласно рис. 2,с это приведет к увеличению работы выхода электронов A_e с Au-поверхности AuNi-контактов Шоттки.

Для плоских контактов больших площадей $S \rightarrow \infty$ модуль $|E^*| \approx |E_{grad}|$ — электростатическое поле $|E^*|$ максимально, а, согласно (2), $|E_l| \rightarrow 0$ минимально и φ^* имеет минимальное значение. Поэтому, как показывают эксперименты, для AuNi/n-GaN контактов Шоттки с линейными размерами больше $D \geq 500$ мкм поверхностный потенциал плоских металлических контактов (работа выхода A_e) практически не зависит от их размеров и формы и приближается к работе выхода сплошной металлической пленки.

Максимальное значение модуля $|E_w| \approx 5 \times 10^5$ В/м для заданной системы AuNi/n-GaN контакта Шоттки было найдено из решения уравнения Пуассона с учетом сил зеркального изображения при $\phi_b = 0.93$ эВ. Таким образом, зная $|E_{grad}| = |E_w|$ и, измерив E^* , из соотношения (2) можно легко определить и результирующее встроенное электростатическое поле периферии E_l .

5. Заключение

Предложенная физическая модель плоского контакта металл — полупроводник с барьером Шоттки основана на определяющей роли периметра P , в формировании его основных приборных характеристик. Столь сильное влияние периметра осуществляется за счет встроенного электростатического поля периферии E_l возникающего в результате суперпозиции выходящего за боковую поверхность ОПЗ и зависящего от линейных размеров контакта нескомпенсированного электрического поля E^* и электрического поля, образованного градиентом между поверхностными потенциалами контакта и свободной полупроводниковой поверхностью E_{grad} . Предложенная физическая модель пригодна для описания электростатических полей AuNi-контактов Шоттки на широкозонных материалах, например n-GaN, и может использоваться в качестве дополнения к физическим моделям плоских выпрямляющих контактов металл — полупроводник Шоттки — Мотта [14], или Бардина [15]. Из вышеизложенного следует, что наибольшее влияние встроенные электростатические поля периферии будут оказывать на электростатическую систему выпрямляющих контактов М — П микронных и наноразмеров.

Результаты АСМ-исследований электростатической системы TiAl-NiAu/n⁺-GaN омических контактов указывают на преобладающую в них

роль диффузионного механизма переноса подвижных носителей электрических зарядов.

Список литературы

1. Torkhov N. A., Novikov V. A. The Effect of the Periphery of Metal-Semiconductor Schottky-Barrier Contacts on their Electrical Characteristics // *Semiconductors*. 2011. Т. 45, № 1. С. 69—84.
2. Torkhov N. A. Effect of the Periphery of Metal-Semiconductor Contacts with Schottky Barriers on their Static Current-Voltage Characteristic // *Semiconductors*. 2010. Т. 44, № 5. С. 1—12.
3. Торхов Н. А., Божков В. Г., Ивонин И. В., Новиков В. А.. Исследование распределения потенциала на локально металлизированной поверхности n-GaAs методом атомно-силовой микроскопии // *Поверхность*. 2009. Т. 11. С. 1—10.
4. Торхов Н. А., Божков В. Г., Гушин С. М., Новиков В. А. Оптимизация умножительного диода Шоттки миллиметрового диапазона // 22-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2012. С. 635—636.
5. Торхов Н. А., Новиков В. А., Мармалюк А. А., Рябоштан Ю. Л. Влияние морфологии поверхности на приборные характеристики планарных InP/GaAs диодов Шоттки миллиметрового диапазона // 22-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2012. С. 633—634.
6. Торхов Н. А., Божков В. Г., Новиков В. А., Ивонин И. В. Исследование электрических полей Ni/GaN контактов металл — полупроводник с барьером Шоттки методами атомно-силовой микроскопии. 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии // Севастополь, 2015. С. 611—612.
7. Cornelia M., Carolus J., Krämer M. Gallium nitride-based microwave high-power heterostructure field-effect transistors : design, technology, and characterization // Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven. 2006. Proefschrift.
8. Торхов Н. А. Влияние электростатического поля периферии на вентильный фотоэффект в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки // *ФТП*. 2018. Т. 52, № 10. С. 1150.
9. Мамедов Р. К. Контакты металл — полупроводник с электрическим полем пятен. Баку : БГУ, 2003.
10. Торхов Н. А. Влияние фото-ЭДС на токопрохождение в контактах металл — полупроводник с барьером Шоттки // *ФТП*. 2011. Т. 45, № 7. С. 965—973.
11. Торхов Н. А. Поверхностный потенциал контактов металл — полупроводник с барьером Шоттки // *Известия ВУЗов. Физика*. 2008. Депонировано в ВИНТИ № 334-B2008 от 18.04.2008.
12. Torkhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A., Salnikov A. S., Dobush I. M., Novikov V. A., Ivonin I. V. Nature of size effects in compact models of field effect transistors // *Journal of Applied Physics*. 2016. Т. 119. С. 094505.
13. Миронов Л. В. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, Институт физики микроструктур РАН. 2004.
14. Meyerhof W. E. Contact potential difference in silicon crystal rectifiers // *Phys. Rev.* 1947. Т. 71, № 10. С. 727.
15. Rhoderick E. H., Williams R. H. Metall-semiconductor contacts // 2nd ed. Clarendon. Oxford, 1988.

Информация об авторах

Торхов Николай Анатольевич, ведущий инженер-технолог ЦК ТКИС АО «НИИПП» Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Новиков Вадим Александрович, доцент, Физический факультет Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 36. ORCID 0000-0002-2195-4060.

Information about the authors

Nikolay A. Torkhov, Leading Process Engineer of the Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices, Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Vadim A. Novikov, assistant professor of Tomsk State University, Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenina Av. 36. ORCID 0000-0002-2195-4060.

УДК 621.396.967; 621.396.662

Средства производственного контроля автодинных радиовзрывателей в период Второй мировой войны¹

Носков В. Я.

*Уральский федеральный университет
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
noskov@oko-ek.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Рассмотрены основные аспекты создания радиовзрывателей в годы Второй мировой войны. Представлены результаты анализа технических решений контрольно-тестового оборудования автодинных радиовзрывателей, которое применялось при их производстве в США, Англии и Канаде в годы Второй мировой войны. Рассмотрено оборудование в виде металлических загрузочных боксов, которое экранирует излучение автодинов в пространство. Избыточная емкость, создаваемая стенками бокса, для радиовзрывателей метрового диапазона была нейтрализована индуктивной компенсацией внутри бокса. Рассмотрены также особенности конструкции боксов для радиовзрывателей дециметрового диапазона.

Ключевые слова: автодин, радиовзрыватель, автодинный радиовзрыватель, тестовое оборудование, загрузочный бокс.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Носков В. Я. Средства производственного контроля автодинных радиовзрывателей в период второй мировой войны // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 227—244.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Носков, В. Я. Средства производственного контроля автодинных радиовзрывателей в период второй мировой войны / В. Я. Носков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 227—244.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Industrial check means of autodyne proximity fuses during World War II

V. Ya. Noskov

Ural Federal University

19, Mira Str., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

noskov@oko-ek.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *The basic aspects of radio fuses designing during the Second World War are considered. The results of the analysis of technical solutions for the control and test equipment of autodyne radio fuses, which were used in their production in the USA, England and Canada during the Second World War, are presented. The equipment in the form of metal loading boxes which shields the radiation of autodynes into the space is considered. The excessive capacity created by the box walls for meter-wavelength fuses was neutralized by inductive compensation inside the box. The design features of boxes for decimeter-wavelength range fuses are also considered.*

Keywords: *autodyne, radio fuse, autodyne radio fuse, test equipment, boot box.*

For citation (IEEE): V. Ya. Noskov, “Industrial check means of autodyne proximity fuses during World War II,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 227–244, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.21

1. Введение

В настоящее время автодины применяются в различных радиолокационных датчиках и измерителях на транспорте, промышленности и научных исследованиях [1—7]. Однако наиболее широкое использование они получили в качестве датчиков неконтактных взрывателей боеприпасов (радиовзрывателей — РВ) [8—12]. При реализации РВ простота конструкции, малые габариты и вес, а также низкая стоимость таких приемопередатчиков оказались наиболее ценными их качествами, которые достигнуты благодаря совмещению функций передатчика зондирующего и приемника отраженного от объекта локации излучения в одном каскаде — автогенераторе. Принцип действия этих устройств основан на автодинном эффекте — реакции генератора на внешнее воздействие, которая состоит в изменениях практически всех параметров генератора (амплитуды и часто-

ты колебаний, а также токов и напряжений смещения активного элемента генератора). Регистрация этих изменений в виде автодинного сигнала и его обработка обеспечивают решение задач обнаружения цели и измерение ее параметров относительного движения.

Автодинные РВ были разработаны и поставлены на самое массовое производство в США, Англии и Канаде в годы Второй мировой войны. Общий объем выпуска их превысил 20 миллионов штук. Он в несколько раз превосходил масштабы производства иной радиоэлектронной продукции военного назначения в те годы.

Наиболее ответственная за тактико-технические характеристики часть РВ — это, безусловно, его радиолокационная головка, собственно автодинный приемопередатчик. Сложность задачи контроля параметров этой части в условиях производства состоит в том, что автодин непосредственно связан с антенной и в реальных условиях он “работает” на свободное пространство. В связи с этим возникает вопрос, каким образом на производственных предприятиях в условиях скученности оборудования и ограниченности пространства удалось решить проблему электромагнитной совместимости? Поскольку поиск решения этой проблемы актуален и в наши дни, целью данной работы является анализ технических решений контрольно-тестового оборудования, которое применялось в ходе производства РВ в США, Англии и Канаде в годы Второй мировой войны.

2. Историческая справка о создании радиовзрывателя

“Сегодня один из наиболее прекрасных дней в моей жизни, поскольку вы показали мне оружие, с которым мы победим нацизм” — У. Черчилль, 1939 г.

Как отмечено выше, наиболее широкое применение автодины получили в годы Второй мировой войны в качестве датчика «близости» для дистанционных взрывателей. Сама идея создания такого взрывателя, который самостоятельно обнаруживал бы цель на заданном расстоянии, не являлась уникальной и высказывалась многими специалистами разных стран задолго до 1939 года. Неоднократно предпринимались попытки создания такого взрывателя, используя различные физические принципы и явления (инфракрасный, электростатический, магнитный, акустический и др.). Однако комплекс проблем на пути реализации этой идеи в то время был практически непреодолим [12—14].

Разрешить стоящие проблемы удалось английскому ученому А. Бьюменту (см. рис. 1, а) (William Alan Stewart Butement) [15]. Будучи помощником директора по научным исследованиям департамента Экспериментального Корпуса Воздушной Защиты (Air Defense Experimental

Establishment — ADEE), он руководил исследованиями по повышению эффективности зенитного и артиллерийского вооружения береговой защиты (CD) с применением радиолокационной техники. В октябре 1939 года он совместно с коллегами завершил разработку предложенного им дистанционного радиовзрывателя, в котором использовался в качестве датчика близости автодинный приемопередатчик. Эти взрыватели первое время пошли на оснащение авиационных бомб и реактивных снарядов, на борту которых механические воздействия на элементы электроники сравнительно невелики. Однако технологические возможности Великобритании того времени не позволили создать промышленный образец такого радиовзрывателя для артиллерийских орудий, выдерживающего механические перегрузки при артиллерийском выстреле.

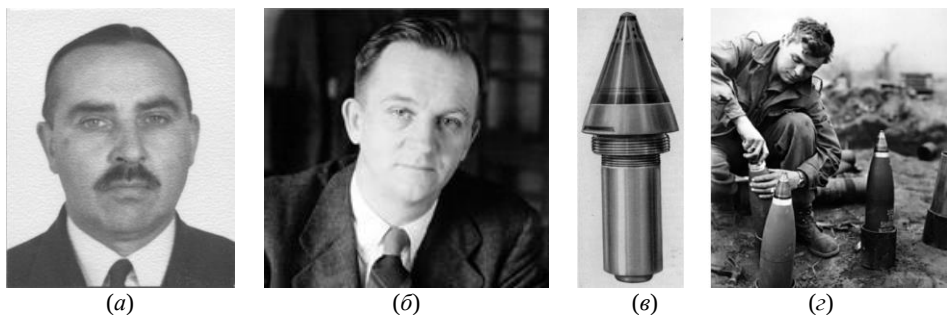


Рис. 1. Изобретатель автодинного радиовзрывателя английский ученый У. А. С. Бьютмент (а) и американский ученый-физик М. Э. Тьюв (б), сумевший создать автодинный радиовзрыватель для артиллерийских систем. Автодинный РВ (в) и американский солдат, готовящий снаряды к выстрелу (г).

Fig. 1. An English scientist W.A.S. Butement, the inventor of the autodyne radio fuse (a). An American physicist M.A. Tuve, who managed to design an autodyne radio fuse for artillery systems (b). Autodyne RF (c) and an American soldier preparing shells for firing (d).

В соответствии с неформальным соглашением между У. Черчиллем (Sir Winston Leonard Spencer-Churchill) и Ф. Д. Рузвельтом (Franklin Delano Roosevelt) об обмене научной информацией потенциально военного значения в сентябре 1940 г. США посетила английская делегация. Она передала американским коллегам наряду с другими разработками уникальный по своим параметрам (для того времени, конечно) магнетронный генератор для РЛС, а также документацию и образец РВ. Оба передаваемых объекта были высоко оценены американскими инженерами, которые по данным направлениям также вели работы, но менее успешно [16—18]. Схема английского РВ была принята за основу для разработки американского варианта взрывателя для артиллерийских систем [19].

Руководил проектом по созданию артиллерийского варианта РВ прекрасный организатор науки, известный ученый — физик, М.Э. Тьюв (Merle Antony Tuve) (см. рис. 1, б) [20]. При создании нового изделия [21] он сумел сконцентрировать усилия многих ученых и инженеров из самых разных фирм и университетов, внедрить последние технические и технологические новинки. Например, в сжатые сроки были разработаны ударостойкие электронные лампы и миниатюрные компоненты, которые ранее использовались в слуховых аппаратах; новые виды пластмасс и компаундов для заливки узлов электронных схем; источники питания, обеспечивающие длительное хранение без потери емкости; впервые при производстве аппаратуры использована технология печатного монтажа и многое другое.

Благодаря высокому научно-техническому и технологическому потенциалу Америки концепция и схема Бьютмента менее чем через год были адаптированы под самое массовое производство РВ в США, Британии и Канады (см. рис. 1, в). На последних стадиях войны зенитные снаряды, снабженные РВ, играли основную роль в защите Лондона от немецких летающих бомб V-1, отражении налетов немецкой авиации на караваны судов с поставками по Ленд-лизу (Lend-lease) и атак японских камикадзе на Тихоокеанском театре военных действий. При выполнении сухопутных операций на европейской территории после открытия союзниками Второго фронта также использовались артиллерийские снаряды с РВ против немецкой пехоты, показавшие высокую эффективность (см. рис. 1, г). Поскольку РВ вызывает подрыв снарядов на высоте 6—15 метров, то в таких случаях от осколков пехоту не спасают даже окопы. Жизни многих тысяч солдат союзников удалось сохранить благодаря созданию и активному использованию в боевых действиях снарядов с автодинными РВ. По мнению многих высокопоставленных военных, политиков и экспертов создание этого устройства считается вторым по важности после атомной бомбы достижением техники вооружения за годы ВМВ.

После войны М. Тьюв получил медаль “За заслуги” от президента Трумэна и был награжден орденом Британской империи. По этому случаю М. Тьюв, отметив свою роль в контексте, сказал, что “...радиовзрыватель не был изобретением одного человека; в нем было заложено множество изобретений и усовершенствований, как в США, так и в Британии” [22]. В свою очередь А. Бьютмент, годами позже, говорил, что он рассматривает радиовзрыватель как его наиболее важное достижение в жизни.

3. Краткие сведения об устройстве радиовзрывателей

Разработка и постановка на производство РВ для вращающихся снарядов, таких как зенитные и артиллерийские снаряды, были выполнены в 1941 году под эгидой Главного управления военно-морских сил (ГУ ВМС) США (United States Department of the Navy).

В то время как разработкой взрывателей для не вращающихся боеприпасов, таких как бомбы, ракеты и мины, руководило Главное управление сухопутных войск (ГУ СВ) США (United States Army). Далее рассмотрим конструктивные особенности РВ, разработка и процесс производства которых контролировались службами ГУ СВ. Некоторые из этих взрывателей, установленных на боеприпасах, показаны на рис. 2.

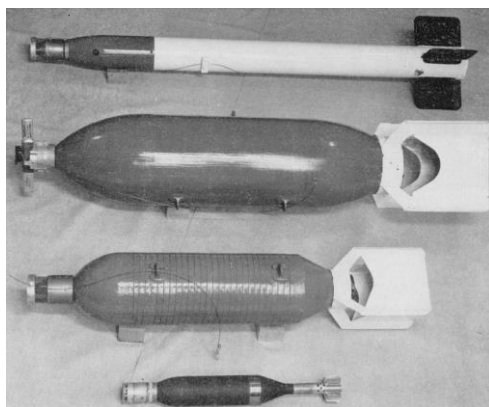


Рис. 2. Внешний вид (см. сверху вниз) высокоскоростной самолетной ракеты, бомб массой 500 и 265 фунтов и снаряда для минометного 81-мм орудия, оснащенных РВ.

Fig. 2. Appearance (see from top downwards) of a high-speed aircraft missile, bombs weighing 500 and 265 pounds, and a shell for a mortar 81-mm gun equipped with an RF

Существование РВ было одним из самых тщательно охраняемых секретов США и их союзников, поскольку РВ является неочевидным достижением науки и техники, поставившим средства вооружений на качественно новый уровень. Ученые многих стран имели представление о возможности создания такого РВ, но только США и их союзники смогли перейти от концепции к практической реализации, эффективной эксплуатации и производству. Простой в общей теории, РВ чрезвычайно сложен в достижении реализации идеи, находящейся за гранью творческого успеха. Он объединил в единое целое целый ряд научных и практических аспектов.

Во-первых, РВ должен удовлетворять чисто военным требованиям, таким как конструктивно соответствовать существующим боеприпасам,

т.е. он должен легко заменять другие типы взрывателей, например, механические. Во-вторых, он должен быть способен выдерживать длительные условия хранения и работать в широком диапазоне температур. В-третьих, он не должен изменять баллистические характеристики боеприпасов. В-четвертых, он должен соответствовать другим строгим требованиям, касающимся времени активации, безопасности и эффективности боеприпаса, а также выдерживать механические перегрузки при транспортировке и использовании. Например, при выстреле из миномета перегрузки на элементы РВ могут составлять до 10g. Ограничения по габаритам для РВ, обусловленные необходимостью взаимозаменяемости с механическими взрывателями, поставили разработчиков в очень жесткие условия. В этот объем должны поместиться такие узлы РВ, как приемопередатчик с антенной, усилитель с тиратроном, генератор переменного тока с выпрямителем и фильтром и другие (см. рис. 3).

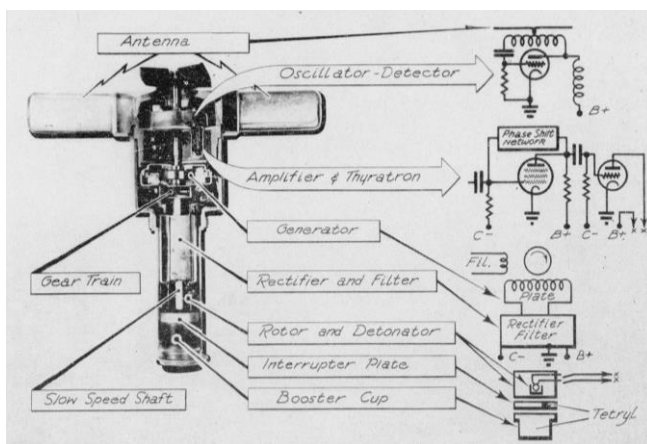


Рис. 3. Общий вид РВ в поперечном сечении (слева) и его основные узлы (справа): Antenna — антенна; Oscillator-Detector — генератор-детектор (автодин); Amplifier and Thyatron — усилитель и тиратрон; Generator — генератор переменного тока источника питания; Rectifier and Filter — выпрямитель и фильтр источника питания; Gear Train — зубчатая передача от оси пропеллера (вверху) к ротору генератора; Rotor and Detonator — ротор генератора и детонатор; Interrupter Plate — пластина прерывателя; Booster Cup — чашка инициатора; Slow Speed Shaft — вал малой скорости; Tetryl — взрывчатое вещество.

Fig. 3. General view of the RF in cross section (left) and its main nodes (right)

Перечисленные выше требования к элементам и узлам РВ вызвали необходимость разработки новых малогабаритных и, в тоже время, прочных радиоэлектронных компонентов. К счастью, тенденции достижения “малогабаритности” и “прочности” идут “вместе”. Вес элементов пропор-

ционален кубу линейного размера, а опорная площадь пропорциональна его квадрату. Таким образом, уменьшение размеров в 10 раз приводит к тому, что прочность объекта при ускорении также увеличивается на порядок. Сопротивление центробежным силам и изгибающим моментам также значительно увеличивается за счет уменьшения размера. Это есть причина, что электронные компоненты, которые обычно считаются хрупкими, могут быть сконструированы таким образом, чтобы выдерживать высокие вибрационные и ускоряющие силы, возникающие в различных снарядах.

4. Организация производства радиовзрывателей

Для ускорения процесса массового производства под каждый тип РВ были разработаны типовые проекты цехов, планы размещения сборочных линий отдельных узлов и устройства в целом, участков испытания на ударные и вибрационные воздействия, а также контроля чувствительности автодинного приемо-передатчика. В планах размещения оборудования и рабочих мест были предусмотрены участки окончательного тестирования РВ. Вся необходимая документация по развертыванию производства передавалась заинтересованным фирмам. Варианты общего вида отдельных участков цеха по сборке РВ представлены на рис. 4 [10].



Рис. 4. Общий вид участков цеха по сборке РВ.

Fig. 4. General view of the sections of the RF assembly workshop

Контролю качества производства РВ уделялось особое внимание. Выполнение каждой операции контролировалось инспектором ГУ СВ США (по-нашему — военпредом). Количество этих инспекторов насчитывалось порядка 10% от общего числа занятых в производстве. При этом для целей производственного контроля выходных параметров РВ была решена задача создания высокопроизводительных стандов, максимально воспроизводящих условия работы РВ в реальной обстановке (см. рис. 5).

В производственных условиях на участок контроля параметров РВ образцы РВ поступают в полностью собранном виде (см. рис. 5) и какие-либо дальнейшие их конструктивные изменения далее были недопустимы. На этом участке оцениваются рабочие характеристики и качество работы отдельных секций РВ, т.е. высокочастотной (ВЧ) части, усилительной схемы, детонатора и источника питания. При этом оператору не ставилась задача выполнения общего тестирования устройства.

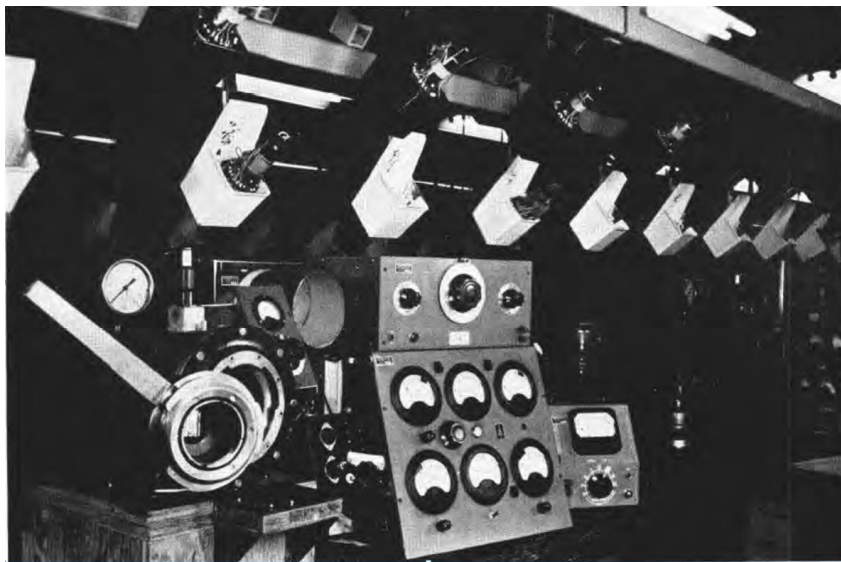


Рис. 5. Окончательная тестовая позиция на производственной линии. В верхней части фотографии показаны взрыватели, прибывающие в небольших коробочках с линии сборочного конвейера.

Fig. 5. The final test position of the production line. At the top of the photo fuses arriving in small boxes from the assembly line are shown

Причины такого подхода связаны с необходимостью выявления конкретного дефекта. Если бы были применены общие тесты, можно было бы компенсировать низкую чувствительность одной части за счет другой, при этом дефект может оказаться замаскированным. Например, РВ с аномально низкой чувствительностью ВЧ части может успешно запускать тиратрон за счет высокого усиления усилительного каскада, поскольку одна секция компенсирует другую. Если ВЧ часть необычно чувствительна, РВ может иметь тенденцию к самовозбуждению. Следовательно, в таком случае вероятность сбоев в РВ сильно возрастает за счет выхода параметров этой части за пределы допуска.

Наиболее ответственная за тактико-технические характеристики часть РВ — это, безусловно, его ВЧ часть, собственно автодинный приемо-передатчик (“oscillator-detector” в американской терминологии тех лет [8—10]). Необходимо отметить, что тестирование РВ необходимо не только во время их изготовления, но и периодически при их длительном хранении с тем, чтобы определить, находятся ли несущая частота и чувствительность автодина в допустимых пределах.

Необходимо отметить, что открытые сведения о РВ и стендовом оборудовании в печати появились только после лета 1944 года, когда в ходе операции против немецких войск, предпринявших контрнаступление, были впервые применены снаряды, оснащенные РВ. До этого случая РВ применялись только на своей территории для отражения воздушного нападения и над морем. После операции против немецких войск они, согласно правилам США, утратили гриф секретности.

5. Тестовое оборудование для радиовзрывателей метрового и дециметрового диапазонов длин волн

Для исключения влияния соседних объектов на поле излучения антенны и взаимодействия между собой контрольно-тестовой аппаратуры измерение параметров РВ выполнялось в экранированных загрузочных устройствах (боксах) (см. рис. 6) [10, 23—25].

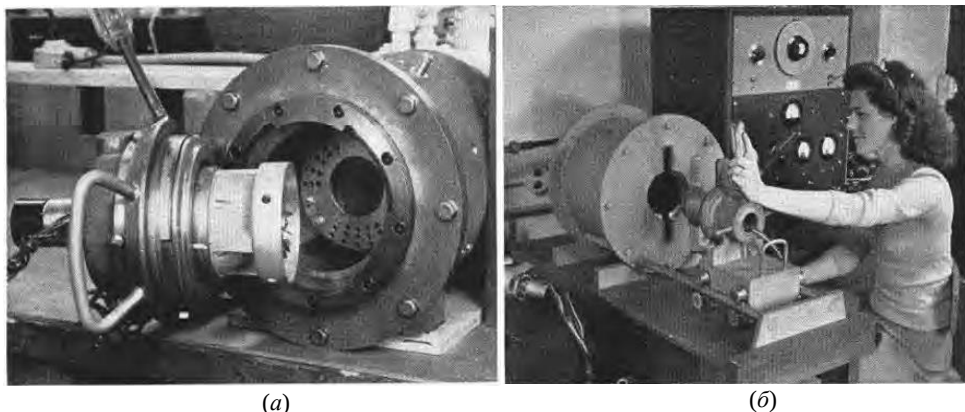


Рис. 6. Тестовое оборудование в виде загрузочных боксов для РВ с круглой формой излучающей системы (а) и с дипольным излучателем (б).

Fig. 6. Test equipment in the form of loading boxes for RF with a round-shaped emitting system (a) and with a dipole emitter (b)

Размеры боксов в поперечнике составляли около 2 футов. Передний щиток бокса, на который крепился РВ, по форме и размерам соответствовал боеприпасам, для которых он предназначался. Эта мера обеспечивает в условиях бокса реализацию условий, близких к реальным, которые имеют место на борту боеприпаса в свободном пространстве. При этом обеспечиваются заданная выходная мощность автодина и требуемая частота генерации.

Избыточная емкость, создаваемая стенками бокса, для РВ метрового диапазона была нейтрализована индуктивной компенсацией внутри бокса (см. поз. "tuning inductance" на рис. 7, а). В некоторых конструкциях боксов [26] для настройки стенда в резонанс наряду с индуктивностью вводились дополнительные конденсаторы постоянной и переменной емкости (см. поз. 3 и 12 на рис. 7, б, в).

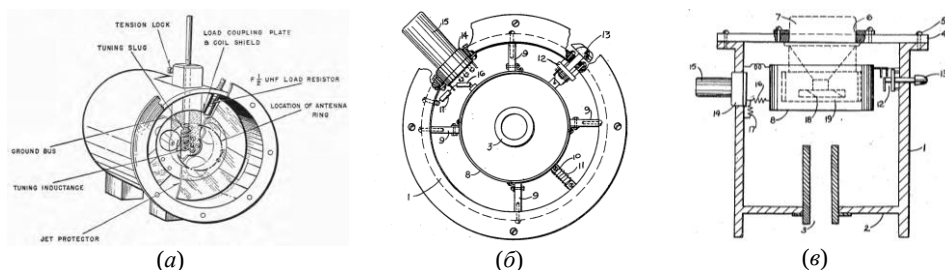


Рис. 7. Компенсация избыточной емкости бокса переменной индуктивностью (а) и параллельным соединением индуктивности, емкости и дополнительного подстроечного конденсатора (б), (в).

Fig. 7. Compensation of the excessive capacity of the box with a variable inductance (a) and with a parallel connection of inductance, capacity and an additional trim capacitor (b), (v)

Для имитации воздействия на автодинный генератор отраженного излучения для РВ метрового диапазона параллельно излучателю подключалось нагрузочное сопротивление. Компенсация его емкостной составляющей производилась также с помощью параллельного соединения емкости и индуктивности. При этом операция подключения нагрузочного сопротивления в первое время выполнялась вручную, что значительно затягивало процесс тестирования РВ (см. рис. 8, а и б).

Для сокращения времени тестирования в дальнейшем были предложены различные технические решения, которые могли вызывать изменения нагрузки генератора иным способом. Наиболее распространенный из них состоял в изменении параметров электронной лампы. Например, посредством изменения выходного сопротивления электронной лампы со стороны катода (см. поз. 15 на рис. 7, б, в и рис. 9, а) при вариациях

напряжения на ее сетки, входного сопротивления со стороны сетки при вариации анодного напряжения или внутреннего сопротивления со стороны анода при вариации сеточного напряжения [25]. В некоторых случаях в качестве имитатора использовался диодный выпрямитель с изменяемым от низкочастотного генератора смещением и индикатор настройки [10] (см. рис. 9, б и в). Когда эта цепь была настроена на резонансную частоту, она вносила в автодинный генератор только вариации резистивного сопротивления нагрузки. При этом параметры вносимого сопротивления и глубины его модуляции обычно определялись путем опытного подбора под условия работы РВ в свободном пространстве.



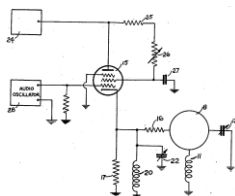
(a)



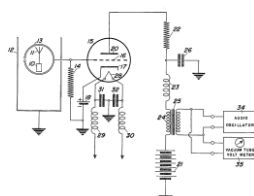
(б)

Рис. 8. Подключение скомпенсированных параллельным соединением индуктивности и емкости резисторов к излучателям РВ круглой формы (a) и с диполем (б).

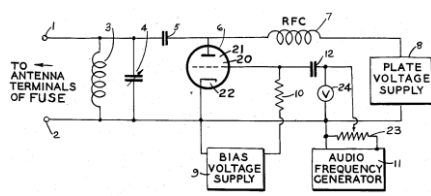
Fig. 8. Connection of the resistors compensated by a parallel assembly of the inductors and capacitance to the round-shaped radiators of RF (a) and with a dipole (b)



(a)



(б)



(в)

Рис. 9. Варианты подключения к РВ электронной лампы для изменения нагрузки генератора при тестировании автодинов: в цепь катода (a) [26], в цепь управляющей сетки (б) [27] и в цепь анода (в) [28] электронной лампы.

Fig. 9. Variants of connecting an electronic lamp to the RF to change the oscillator load while testing autodynes: to the cathode circuit (a) [26], to the control grid circuit (б) [27] and to the anode circuit (в) [28] of the electronic lamp

Боксы экспериментальных стендов для РВ дециметрового диапазона выполнялись в виде встроенных одна в другую аксиально двух отрезков труб различных диаметров. При этом они реализовали отрезок коаксиальной линии, настраиваемый в резонанс на рабочую частоту РВ при помощи подвижного шунта с резистором, контактирующего с поверхностями обеих труб (см. рис. 10, поз. 34). Для изменения нагрузки генератора, имитирующего воздействие на автодинный генератор отраженного излучения, в полость резонатора вводилась нагруженная резистором рамка, вращающаяся вокруг своей продольной оси при помощи микроэлектродвигателя (см. поз. 43 на рис. 10, *а, б* [29]). В иных конструкциях для имитации изменений нагрузки генератора использовалась неподвижная рамка, в разрыв которой был подключен модулирующий диод (39) (см. рис. 10, *в* [30]).

Для контроля частоты генерации автодина обычно использовался частотомер или измерительный приемник, слабо связанные с полем коаксиального резонатора через зонд (см. поз. 56 на рис. 10, *а* и *б*) и (см. поз. 35 на рис. 10, *в*). Необходимо отметить, что для исследования РВ на воздействие активных помех описанные стенды также могут быть использованы. Для этого можно использовать аналогичные зонды для ввода сигнала помех в полость коаксиального резонатора.

FIG.1.

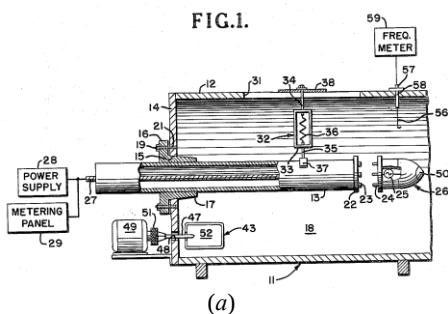


FIG.1.

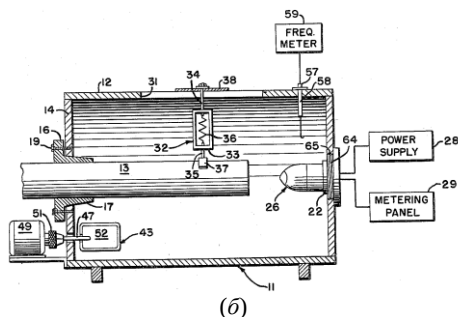
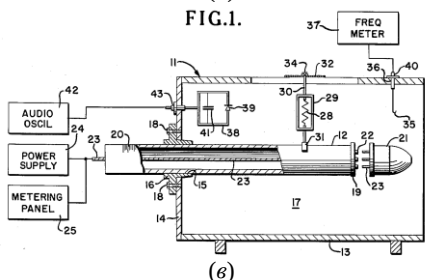


Рис. 10. Варианты конструкции бокса экспериментального стенда для тестирования автодинных РВ дециметрового диапазона при выполнении бокса в виде отрезка коаксиальной линии.

Fig. 10. Experimental stand box design variants for testing autodyne RF of the decimeter-wavelength range; the box is made in the form of a segment of a coaxial line

Вышеописанные стенды из-за резонансных свойств камер могли тестировать РВ только определенного типа и в строго ограниченном диапа-

зоне частот. На практике часто необходимо тестировать РВ, находящихся на хранении, которые имеют разные рабочие частоты, типы антенн (электрические и магнитные) и различные диаграммы направленности антенн. В таком случае, очевидно, что желательно иметь испытательное оборудование, в котором исключается применение резонансных камер. Одно из таких технических решений стенда, способного решать указанную проблему, представлено на рис. 11 [31].

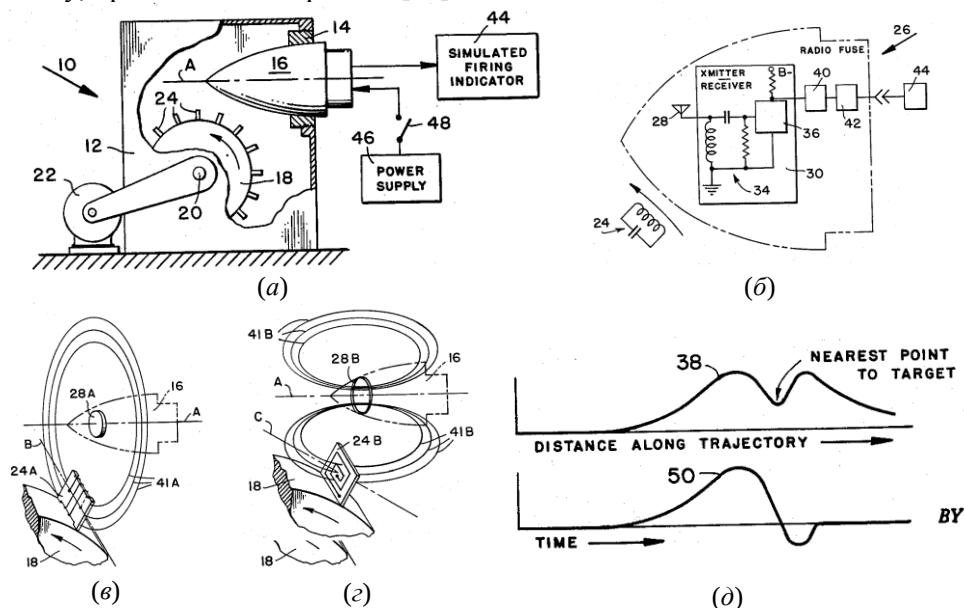


Рис. 11. Вариант конструкции бокса экспериментального стенда для тестирования автодинных генераторов РВ дециметрового диапазона, использующих различные типы антенн (а); функциональная схема РВ (б); схемы взаимодействия концентрического магнитного поля антенны РВ с катушкой (в), (г); кривые зависимости огибающей сигнала от величины относительного расстояния между целью и РВ (д).

Fig. 11. An experimental stand box design variant for testing autodyne RF of the decimeter-wavelength range using various types of antennas (a); RF functional circuit (b); interaction schemes of the concentric magnetic field of the RF antenna with the coil (c), (d); curves of the envelope of the signal on the relative distance between the target and the RF (d)

Стенд 10 (см. рис. 11, а) включает в себя бокс 12, который снабжен отверстием 14, выполненным с возможностью установки РВ 16. Внутри бокса 12 имеется колесо 18, выполненное из диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью. Ось 20 этого колеса посредством шкивов и приводного ремня связана с вращающимся двигателем 22. Устройство 10 может тестировать любое требуемое количество РВ, имеющих различные диа-

граммы направленности антенны и несущей частоты. С этой целью в нем имеется множество открытых настроенных на требуемую частоту катушек 24, которые расположены под определенным углом по периферии колеса 18. Для каждого из типов РВ имеется соответствующая катушка, которая наиболее эффективно взаимодействует с полем излучения антенны РВ. РВ 16 (см. рис. 11, б) представляет собой миниатюрный доплеровский радиолокатор 26, содержащий антенну 28, автодинный приемо-передатчик и схему обнаружения. Приемо-передатчик 30 содержит резонансную схему 34, связанную с антенной 28 и активный элемент 36 автодина, который работает одновременно в режиме генерации и преобразования частоты доплеровского сигнала.

На рис. 11, в представлена схема взаимодействия концентрического магнитного поля антенны РВ с катушкой концентрического магнитного поля 41а антенны РВ с катушкой 24а, плоскость которой совпадает с осью РВ, а на рис. 11, г — схема взаимодействия эллиптического магнитного поля 41в антенны РВ с катушкой 24в, плоскость которой перпендикулярна оси РВ.

Для решения задачи обнаружения цели в РВ 26 (см. рис. 11, д) используется известное в радиолокации явление особенностей формирования доплеровского сигнала при относительном перемещении цели и ракеты. Кривая огибающей сигнала сначала увеличивается по мере приближения РВ к цели из-за увеличения амплитуды отраженного излучения. Затем вблизи точки наименьшего расстояния между целью и ракетой амплитуда доплеровского сигнала имеет “провал” в связи с нулевым значением частоты Доплера. График этой зависимости отражен в виде кривой 38 на рис. 11, д. Этот сигнал выделяется полосовым усилителем и передается в схему обнаружения для выдачи команды на подрыв боевой части снаряда в наиболее выгодном положении относительно цели для ее поражения.

6. Заключение

Одним из крупнейших достижений результатов исследований и разработок радиовзрывателей времен Второй мировой войны явилось то, что они проложили путь к миниатюризации, которая вошла в электронную промышленность и создала предпосылки для нынешней эры интегральных схем. Создание радиовзрывателя явилось мощным толчком к развитию целых направлений в электронной технике и материаловедении, освоению новых передовых технологий в приборостроении и военной техники, а также теоретической базы, без которой любой прогресс в науке и технике практически невозможен.

Результаты выполненного обзора технических средств контроля основных параметров автодинных радиовзрывателей видно насколько оригинальными и интересными были технические решения, позволившими в короткие сроки решить проблему не только создания взрывателя качественно нового уровня, но и поставить их на массовое производство. По нашему мнению, эти решения представляют в наши дни не только историческую, но и техническую ценность.

Интересно отметить, что путь от идеи до серийного образца радиовзрывателя, проделанный американскими коллегами за год, в условиях СССР потребовал нескольких лет. Как нам представляется, это связано не только со значительным различием в уровне развития технологий, но и с порядком организации научной и изобретательской деятельности ученых и инженеров. В поддержку этого тезиса уместно привести интересные воспоминания о М. Э. Тьюв его биографа П. Абельсона (P. H. Abelson) [22]. Он отмечал, что основным компонентом успеха М. Э. Тьюв при разработке радиолокационного взрывателя было, несмотря на военное положение, использование демократических принципов в своей работе и в общении с людьми. Эти принципы, по словам самого М. Э. Тьюв, “...работают так хорошо, что вся команда охватывает все так энергично, что в процессе большинства работ была борьба, как бы мне удержаться вместе с ними. Я часто чувствовал себя подобно коротконогому ослу, пытающемуся удержаться и не отстать от бегущих скаковых лошадей”.

Список литературы

1. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В. Физика радиоволновых и оптических автодинов. — Саратов : Изд-во СГУ, 2003. 310 с.
2. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В., Постельга А. Э. Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 130—134.
3. Усанов Д. А., Постельга А. Э. Восстановление сложного движения участка тела человека по сигналу радиоволнового автодина // Медицинская техника. 2011. Т. 45, № 1. С. 8—10.
4. Лушев В. П., Воторопин С. Д., Дерябин Ю. Н., Журинов Ю. Б., Потапов М. Г. Автодинные СВЧ датчики перемещения для измерения скорости горения высокоэнергетических композиционных материалов // 15-я Международная крымская конференция “СВЧ-техника и телекомм. технологии”. Севастополь, 2005. С. 831—833.
5. Закарлюк Н. М., Носков В. Я., Смольский С. М. Бортовые автодинные датчики скорости для аэробаллистических испытаний // 20-я Международная крымская конференция “СВЧ-техника и телекомм. технологии”. Севастополь, 2010. С. 1065—1068.
6. Комаров И. В., Смольский С. М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. — М. : Горячая линия. Телеком. 2010. 391 с.

7. Носков В. Я., Варавин А. В., Васильев А. С., Ермак Г. П., Закарлюк Н. М., Игнатков К. А., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 9. Радиолокационное применение автодинов // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. № 3. С. 32—86.
8. Rocket F. Proximity Fuze // *Electronics*. 1945. № 11. С. 110—111.
9. Hulton R. D., Miller B. J. Generator-Powered Proximity Fuze // *Electronics*. 1945. № 12. С. 98—103.
10. Ellett A., Bush V., Conant J. B. Radio Proximity Fuzes for FIN-Stabilized Missiles // USA, office of SRD, NDRC. Columbia University. Division of War Research. Washington, D. C., 1946. Т. 1. 488 с.
11. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne System with a Single Antenna // 11-th International Radar Symposium (IRS 2010). Conference Proceedings (Vilnius, Lithuania 16—18 June 2010). Vilnius, Geozondas LTD, 2010. С. 406—409.
12. Носков В. Я. История зарождения и развития автодинных радиовзрывателей // 23-я Международная крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь, 2013. С. 26—29.
13. Burns R. W. Early History of the Proximity Fuze (1937–1940) // *IEE Proceedings A — Science, Measurement and Technology*. 1993. Т. 140. № 3, С. 224—236.
14. Burns R.W. Factors Affecting the Development of the Radio Proximity Fuse 1940–1944. *IEE Proceedings — Science, Measurement and Technology*. 1996. Т. 143, № 1. С. 1—9.
15. Носков В. Я. Автодинный радиовзрыватель — гениальная заслуга А. Бьютмента // 27-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Москва; Минск; Севастополь, 2017. Т. 8. С. 1734—1740.
16. W.A.S. Butement. Available at: <http://ru.wikipedia.org/> (accessed 10 April 2017).
17. History of radar. <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/639958>.
18. Butement W. A. S., Pollard P. E. Coastal Defense Apparatus. *Inventions Book of the Royal Engineers Board*, Jan. 1931.
19. Butement W. A. S., Shire E. S., Thomson A. F. H. Пат. 585 791 (Великобритания) Improvements in or Relating to Projectiles. February 25, 1947.
20. M. A. Tuve. Available at: <http://www.nap.edu/html/biomems/mtuve.html> (accessed 10 April 2013).
21. Tuve M. A., Roberts R. B. Пат. 3 166 015 (США). Radio Frequency Proximity Fuze. June 19, 1965.
22. Abelson P. H. Marle Antony Tuve: 1901–1982. A Biographical Memoir. National Academies Press. Washington D. C. Copyright 1996. Available at: [html/biomems/mtuve.pdf](http://www.nap.edu/html/biomems/mtuve.pdf) (accessed 10 April 2013).
23. Hinman W. S., Brunetti C. Radio Proximity Fuze Design // *Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards*. RP-1723. 1946. Т. 37, № 7. 18 с.
24. Hinman W. S., Brunetti C. Radio Proximity Fuze Development // *Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons*. 1946. № 12. С. 976—986.
25. Page C. H., Astin A. V. Survey of Proximity Fuze Development // *American Journal of Physics*. 1947. Т. 15, № 2. С. 95—110.
26. Nels J., Bradley W. E. Пат. 2 448 889 (США). Proximity Fuse Testing Apparatus. September 16, 1944.
27. Jackson F.H. Пат. 2 715 725 (США). Circuit Tester for Electronic Fuzes for Munitions. July 31, 1946.
28. Bell R. A. Пат. 2 727 140 (США). Proximity Fuse Adjusting Means. August 25, 1944.
29. Plotkin G. N. Пат. 3 015 820 (США). Radiation Load Simulator for Proximity Fuse. August 04, 1958.

30. King D. D. Пат. 3 025 462 (США). Radiation Load Simulator. October 12, 1956.
31. Quinlivan J. E. Пат. 3 161 878 (США). Apparatus and Method for Testing Radio Fuses. March 07, 1961.

Информация об авторе

Носков Владислав Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета, г. Екатеринбург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-2434-1742.

Information about the author

Vladislav Ya. Noskov, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-2434-1742.

УДК 621.396(091)

Возникновение и история развития спортивной радиопеленгации в Крыму¹

Пузанков Л. А.

*Российский телеграфный клуб
Симферополь, Крым, Российская Федерация
r7ka@mail.ru*

Получено: 20 июля 2019 г.

Отрецензировано: 9 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Кратко изложена история возникновения спортивной радиопеленгации в европейских странах, в Советском Союзе и в Крыму. Отмечаются достижения крымчанина Анатолия Рыженко — чемпиона Украины в ряде соревнований, проводившихся в 1960—1962 гг. Рассмотрено состояние спортивной радиопеленгации в Крыму в 90-х гг. Описаны особенности процедур проведения соревнований по радиоориентированию и спринту, а также пеленгования на диапазонах 144 МГц и 3,5 МГц.

Ключевые слова: «охота на лис», «радиоохота», «радиоориентирование», Михаил Васильевич Мызников, Владислав Петрович Шевченко, Анатолий Рыженко.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пузанков Л. А. Возникновение и история развития спортивной радиопеленгации в Крыму // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 1. С. 245—256.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пузанков, Л. А. Возникновение и история развития спортивной радиопеленгации в Крыму / Л. А. Пузанков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 245—256.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Emergence and history of development of radio direction finding sports in Crimea

L. A. Puzankov
Russian Telegraph Club
Simferopol, Crimea, Russian Federation
r7ka@mail.ru

Received: July 20, 2019
Peer-reviewed: September 9, 2019
Accepted: September 16, 2019

Abstract: *The history of the appearance of sports direction finding in European countries, in the Soviet Union and in the Crimea is briefly described. The achievements of Crimean Anatoly Ryzhenko – the champion of Ukraine of competitions held in 1960–1962. The state of sports radio direction finding in the Crimea in the 90s is considered. The features of the procedures of radio orientation and sprint competitions, as well as direction finding in the 144 MHz and 3.5 MHz ranges, are described.*

Keywords: *Fox Hunt, Radio Hunting, Radio Orientation, Mikhail Vasilyevich Myznikov, Vladislav Petrovich Shevchenko, Anatoly Ryzhenko.*

For citation(IEEE): L. A. Puzankov, “Emergence and history of development of radio direction finding sports in Crimea,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 245–256, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.22

1. Введение

Спортивная радиопеленгация, традиционно называемая в прошлом «охотой на лис», является интересной группой спортивных дисциплин радиоспорта. Сущность спортивной радиопеленгации заключается в сочетании оперативного пеленгования радиопередатчиков, установленных на контрольных пунктах (КП), бега и ориентирования на местности различного характера. В ходе соревнований спортсмену необходимо выбрать оптимальный маршрут поиска радиопередатчиков, на максимально возможной скорости за кратчайшее время обнаружить их и финишировать.

Занятия спортивной радиопеленгацией предполагают усвоение большого объема знаний по радиотехнике, физике распространения радиоволн, умения читать карту, ориентироваться на местности, умения распределять силы, получение практических навыков техники бега по пересеченной местности. При этом спортсмен, занимающийся СРП, должен быть со-

ответствующим образом экипирован для бега по пересеченной местности, хорошо владеть картой, компасом и, самое главное, иметь достаточные навыки управлять приемной аппаратурой и направленными антеннами.

В настоящей статье история развития спортивной радиопеленгации в Крыму дополнена описанием событий, происшедших после 2010 г. и не отраженных в монографии автора [1].

2. Из истории возникновения соревнований «охота на лис»

В радиолобительской литературе временем появления этого вида радиосоревнования обычно упоминают послевоенные годы. Между тем, как свидетельствует публикация в пятом номере журнала «Радиолобитель» за 1929 год, «охота на лис», или, как теперь ее называют, «спортивная радиопеленгация» (СРП), появилась во второй половине 20-х годов прошлого столетия. Оказалось, что спортивная радиопеленгация начиналась как «водный» вид спорта в радиокружках некоторых европейских стран и называлась «радиоохотой».

Как отмечалось в статье журнала, «нетрудно догадаться, что чисто спортивный интерес, привлекающий к работе участников «охоты», служит лишь средством для достижения совершенно определенной и отнюдь немаловажной цели — приобретение навыков, могущих найти широкое применение в военном деле, в деле радиоразведки»².

Как вид радиоспорта, «охота на лис» «родилась» в Голландии в 1947 году. В Советском Союзе после Великой Отечественной войны также появились энтузиасты развития этого вида радиолобительства.

3. Начало развития СРП в Советском Союзе

В 50-х гг. в Крыму также стало постепенно развиваться новое радиолобительское направление: «охота на лис». Среди наиболее активных радиолобителей крымчан в этом выделялись симферопольцы — гвардии капитан запаса Михаил Васильевич Мызников (29.10.1918—17.04.1986) — ветеран Великой Отечественной войны и Владислав Петрович Шевченко.

Первые соревнования по «охоте на лис» на Украине были проведены летом 1957 г. под Киевом, в районе села Бортнычи, в которых приняли участие спортсмены из Киева, Львова, Харькова, Сталино (ныне Донецк), Симферополя и Николаева. От Крыма выступали спортсмены М. В. Мызников (UB5SI) и В. П. Шевченко (UB5SN). Михаил Мызников

² «Передовая» // Радиолобитель. 1929. № 5. С. 161—162.

для поиска «лис» в двухметровом диапазоне использовал пятиэлементную антенну типа «волновой канал» и шестилампный суперсверхрегенератор, укрепленный непосредственно на антенне (рис. 1). Первое место в соревнованиях занял спортсмен из Сталино Юрий Межевич, которому понадобилось всего 43 минуты для обнаружения двух «лис». Всего 4 минуты проиграл ему одноклубник С. Костенко. Третье место было также за представителем из Сталино А. Косенко. Крымчанин Михаил Мызников, хотя и обнаружил две «лисы», по времени в число призеров не попал.

Первый Чемпионат СССР по «охоте на лис» был проведен в июне 1958 г. под Москвой, в районе станции метро «Планерная». Чемпионом страны стал киевлянин Владимир Грекулов, который единственным из всех участников выполнил норматив Мастера радиолобительского спорта. Второе место занял харьковчанин Борис Геселев.

Уже в 1958 году в Крыму были проведены вторые республиканские соревнования по «охоте на лис» на первенство Украины.

Первые международные соревнования по «охоте на лис» были проведены в июне 1960 г. в Лейпциге (Германская Демократическая Республика). Победу одержали москвич Александр Акимов (UA3AG) и ашхабадец В. Фролов. На первом Чемпионате Европы в августе 1961 г. на острове Лидинго (Швеция) Чемпионом Европы стал Александр Акимов.

4. Развитие СРП в Крыму

В 50-х гг. в Крыму, кроме М. В. Мызникова и В. П. Шевченко, появилось большое количество энтузиастов нового направления радиоспорта. Этим стали заниматься Анатолий Рыженко (RB5AGV), Эдуард Пачин (RB5АНМ), Виктор Гресь (UB5JJ) (рис. 2), Валерий Разумов (UT5LA) из Севастополя и др. Они стали создавать аппаратуру, конструировать разнообразные антенны и принимать участие во многих соревнованиях.

Известно, что в СССР в период с 1962 по 1973 гг. проводилось большое количество соревнований по «охоте на лис» различного масштаба, в которых принимали активное участие крымские спортсмены, занимая в них достойные места.

Наивысших достижений в «охоте а лис» среди крымчан достиг Анатолий Васильевич Рыженко (RB5AGV, позднее UB5AGV, UB5SV). Уже в 1959 г. он был включен в состав сборной Крыма, которая в 3-х республиканских соревнованиях в мае 1959 г. занял третье место. В следующем году в Киеве в 4-х республиканских соревнованиях Анатолий Рыженко занял первое личное место в диапазоне 3,5 МГц и второе место в многоборье.

На финальных соревнованиях в Республиканской спартакиаде по техническим видам спорта по «Охоте на лис» в 1961 году А. В. Рыженко, имея второй личный результат, выполнил норматив «Мастера спорта СССР». За команду от Крыма на соревнованиях выступали также Виктор Гресь и Любовь Неделько. По итогам соревнований команда крымчан завоевала первое призовое место.

На состоявшемся в Киеве с 13 по 17 июля 1962 года чемпионате Украины по «охоте на лис» Анатолий Рыженко на диапазонах 2 и 80 метров занял два первых места, завоевав звание абсолютного чемпиона Украины в этом виде спорта (рис. 3). Он был включен в состав сборной команды Украины для участия в 3-м чемпионате Европы по «охоте на лис». По результатам этих соревнований в 1963 г. Анатолий Рыженко был награжден дипломом Федерации радиоспорта СССР «за высокие спортивные результаты, показанные на диапазоне 3,5 МГц».

По программе III Всесоюзной спартакиады по техническим видам спорта ДОСААФ СССР в городе Горький (ныне Нижний Новгород) в августе 1965 г. состоялись Всесоюзные финальные соревнования по «охоте на лис». Все участники, в том числе и Анатолий Рыженко, получили памятные дипломы. В число призеров крымчане не попали.

В 1970 году А. В. Рыженко стал тренером женской сборной команды Крыма по «охоте на лис». На республиканских соревнованиях по «охоте на лис» в 1972 г. в Тернополе и в 1973 г. в Кировограде подопечные Анатолия Рыженко Валентина Александровна Жупанова и Тамара Евгеньевна Диденко завоевали звание чемпионки Украины.

5. Состояние СРП в Крыму после начала 90-х

Несмотря на финансовые трудности и снижение активности желающих заниматься этим увлекательным видом радиоспорта, в Крыму продолжали проводить соревнования по спортивной радиопеленгации и после 1992 г. В соревнованиях на первенство Крыма принимали участие спортсмены ряда городов и районов республики: Симферополь и Симферопольский район, Севастополь и с. Верхнесадовое, Ялта и Белогорск, Нижнегорск и с. Петровка Красногвардейского района и др. Ежегодно в Крыму проводилось 5—7 стартов по СРП. Здесь были и чемпионаты Крыма, и открытые первенства Симферополя, и соревнования для новичков, и различные тематические соревнования по этому увлекательному виду радиоспорта («Крымская осень», «Новогодние старты» и др.).

Более 40 лет назад с помощью тренера из Севастополя Валерия Владимировича Разумова (UT5LA, позднее RT5JB, UU9JB), впервые вышел

на трассы поиска «лис» Николай Бирюков и уже в 1982 г. стал чемпионом Крыма (рис. 4). Благодаря своей настойчивости в овладении спортивным мастерством, Николай в 1991 г. завоевал звание «Мастер спорта СССР». Учась в Севастопольском приборостроительном институте (ныне Севастопольский государственный университет), Николай начал активно заниматься радиоконструированием. В настоящее время он продолжает заниматься СРП, ориентированием на местности и созданием различной аппаратуры для «охоты на лис» (приемники, передатчики, в том числе малогабаритные автоматические, антенны). Н. В. Бирюков является также тренером большого числа крымских спортсменов. Его воспитанница Екатерина Ромашкевич на соревнованиях по СРП в Болгарии в 2009, 2012, 2014 гг. занимала третьи места, в Хорватии на чемпионате мира — 1-е место в составе команды женщин Российской Федерации. Является Мастером спорта международного класса (рис. 5).

Много лет подряд существовала секция СРП при Малой академии наук Крыма «Искатель». Работу с детьми в этом виде спорта долгие годы вела Ольга Витальевна Бирюкова. Многие ее питомцы достигали высоких результатов. Так на Чемпионате Европы по СРП летом 2007 г. ее воспитанница Наталья Прохненко заняла третье место в диапазоне 144 МГц. Команда девушек Украины, в составе которой была и Прохненко, завоевала общее 2-е место. Осенью того же 2007 года в Молдавии состоялся чемпионат Европы по радиоориентированию (новая разновидность «охоты на лис»). Команда юношей Украины заняла первое место. Чемпионом Европы в этом виде спорта стал Николай Бирюков (сын Бирюковых).

После окончания института в 1993 г. Екатерина Федоровна Ромашкевич переехала жить в Симферополь, где продолжила заниматься СРП. В составе команды от Крыма много раз ездила по всей Украине, побывала почти во всех областных центрах. Главным тренером Екатерины стал Николай Бирюков, благодаря которому соревнования по спортивному радиоориентированию в Крыму продолжали активно развиваться. Со временем Екатерина Ромашкевич подключилась и к тренерской работе, занимаясь с молодыми спортсменами.

С 2014 г. Ромашкевич (UB6KAP) совместно с Бирюковым провели в Крыму два первенства России (Бахчисарай — 2017 г., Севастополь — 2018 г.) и Всероссийские соревнования в 2015 г. В этом важном деле им всегда помогали все, с кем они занимались этим видом спорта еще в юношестве: Сергей Гончарук, Татьяна Помазан, Алексей Кунгурцев, Ольга Бирюкова и др.

В последние годы поездки наших спортсменов на соревнования за пределы Крыма, в том числе и в дальнее зарубежье, стали финансироваться со стороны госучреждений: Управления молодежи, спорта и туризма

города Симферополя, Министерства спорта и Регионального отделения ДОСААФ Республики Крым. Так в 2018 г. крымские спортсмены и лица, сопровождающие детей, а также тренеры смогли съездить на все отборочные старты в России. По результатам года двое юных спортсменов (Андрей Воротников и Любовь Лебедева) вошли в состав сборной России, а Тимур Ведмецкий, Кристина Пивоварова, Алена Науменко, Кирилл Воротников — призеры кубка и первенства России — стали кандидатами в сборную России и на 2019 г.

На чемпионат мира по СРП (Южная Корея) в 2018 г. из Крыма смогла поехать Любовь Лебедева, где с большим отрывом от соперниц победила в двух дисциплинах (рис. 6). Всего Любовь привезла из Кореи 3 золотые медали (за победу на диапазоне 3,5 МГц, в дисциплине «спринт» и в команде юниорок 3,5 МГц). Основным тренером Любы является Николай Викторович Бирюков, который тренирует ее с 10-летнего возраста. Сейчас Л. Лебедева — студентка 1-го курса Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, где заместителем директора института является радиолюбитель Дмитрий Пузанков (RC7KD). Любовь Лебедева — лауреат премии Президента России по поддержке талантливой молодежи 2015 года.

За последние годы в спортивной радиопеленгации три крымских спортсмена выполнили нормативы мастера спорта России, два — стали кандидатами в мастера спорта, два — имеют первый спортивный разряд.

6. Процедура проведения соревнований по СРП

Классические соревнования по спортивной радиопеленгации (СРП) проводятся на участках пересеченной местности — в лесу, в горах. Предварительно на местности устанавливается трасса — четыре—пять контрольных пунктов (КП), а также стартовый и финишный коридоры. Каждый из КП оборудован оранжево-белой призмой, устройством отметки прибегавших спортсменов и передатчиком. Передатчики включаются на одной и той же частоте последовательно друг за другом. В течение одной минуты каждый из них передает азбукой Морзе свой позывной сигнал: МОЕ, МОИ, МОС, МОХ или МО5. Еще один передатчик устанавливается на финише. Этот передатчик обеспечивает безопасность участников. Если спортсмен потерял ориентацию, он может с помощью приемника-пеленгатора выйти прямо на этот передатчик. Поэтому передатчик, установленный на финише, работает непрерывно и для него выделяется отдельная частота. Перед стартом спортсмен получает спортивную карту местности и радиоприемник и по команде стартует в начале стартового коридора — тропинки, ограни-

ченной с двух сторон яркой маркировочной лентой. Затем он начинает пеленговать передатчики, по силе сигнала пытается определить их удаленность, а по максимуму или минимуму сигнала при вращении приемника-пеленгатора с антенной определяет направления на них.

Задача спортсмена — построить оптимальный маршрут поиска, обнаружить все КП за минимальное время, произвести отметку на каждом из КП и финишировать в финишном коридоре.

7. Особенности соревнований СРП по радиоориентированию и спринту

В спортивной радиопеленгации существуют четыре официально признанные спортивные дисциплины. Помимо традиционных классических забегов в диапазонах 2 и 80 метров (144 и 3,5 МГц), большой популярностью пользуются спортивная радиопеленгация — «радиоориентирование» и спортивная радиопеленгация — «спринт».

В соревнованиях по радиоориентированию используются маломощные передатчики, работу которых заметно с небольшого расстояния — порядка 100 метров. Спортсмену перед стартом выдается карта с приблизительным расположением контрольных пунктов. По карте и компасу спортсмен должен выйти в район «слышимости» каждого непрерывно работающего радиопередатчика, запеленговать его и обнаружить КП.

Соревнования по спринту — самые зрелищные и динамичные. Их можно проводить в городском парке. Контрольных пунктов в этих соревнованиях вдвое больше, чем в «классике» и расположены они на небольшом расстоянии друг от друга. Сначала спортсмену необходимо обнаружить первую половину КП, передатчики которых передают свои позывные сигналы с небольшой скоростью, затем, пройдя промежуточный финиш, со второго захода обнаружить оставшуюся половину КП, передатчики которых передают свои позывные сигналы с более высокой скоростью. В соревнованиях используются две частоты. На одной частоте, последовательно, в минутном цикле и сеансом 12 секунд работают быстрые передатчики, на другой частоте в таком же режиме — медленные.

8. Как производится отметка на контрольном пункте

Существует два способа отметки на контрольных пунктах — механическая и электронная. Механическая отметка представляет собой компостер, которым спортсмен пробивает выданный на старте стартовый билет. Конфигурация отверстий, оставляемых компостерами на каждом из

КП, отличаются друг от друга и позволяют идентифицировать КП, на котором сделана отметка. Компостер крепится непосредственно над бело-оранжевой призмой.

Для автоматизации процесса регистрации прохождения спортсменами контрольных пунктов применяется также система электронной отметки, состоящая из индивидуальных карточек, которые спортсмен закрепляет на одном из пальцев, станций электронной отметки, установленных вместо компостеров на КП и станций считывания электронной отметки, одна из которых установлена на старте, а другая — на финише. При обнаружении контрольного пункта спортсмен кратковременно подносит карточку к станции электронной отметки и продолжает поиск других КП. Систем электронной отметки существует несколько, но общим для всех систем является возможность идентификации спортсмена по номеру карточки, а также идентификации факта прохождения спортсменом того или иного КП, регистрации времени старта и финиша. Компьютерные программы, принимающие данные от станции считывания электронной отметки, установленной на финише, позволяют полностью автоматизировать процесс судейства и отображения результатов, показанных спортсменами и сделать соревнования более зрелищными.

9. Особенности пеленгования на диапазонах 144 МГц и 3,5 МГц

Соревнования по спортивной радиопеленгации проводятся в двух диапазонах: УКВ — 144 МГц (2 метра) и КВ — 3,5 МГц (80 метров). В зависимости от диапазона в состав приемников-пеленгаторов входят и разные типы антенн. В диапазоне 3,5 МГц используется комбинация штыревой и рамочной антенны. Рамочная антенна имеет диаграмму направленности в виде «восьмерки». Подключение штыревой антенны позволяет определить однозначное направление на источник излучения. При этом в некоторых конструкциях рамочная антенна заменена ферритовой антенной. В диапазоне 144 МГц используются антенны типа «волновой канал» с двумя—четырьмя элементами, имеющие диаграмму направленности в виде лепестка, показывающего на источник излучения искомой «лисы».

Пеленгование на каждом из диапазонов имеет свои особенности. Так, например, радиоволны диапазона 144 МГц очень хорошо отражаются от различных физических объектов, например, от фронта мокрых деревьев, от неровностей поверхности земли, от различных строений и т. д., что приводит к искажению пеленга и выдачи ложного направления на КП. На коротких волнах влияние различных объектов и местности на качество пеленга выражено слабее.

10. Заключение

Число желающих заниматься в Крыму спортивной радиопеленгацией (СРП) с каждым годом неуклонно растет, в чем большая заслуга наших тренеров, стремящихся вырастить гармоничные личности, привить участникам любовь к труду, к природе, воспитать командный дух (рис. 7). Заметим особо, что все крымские спортсмены бегают с аппаратурой крымского конструктора Николая Бирюкова.

Список литературы

- 1 Пузанков Л. А. История радиолубительского движения и радиоспорта в Крыму. Симферополь : Изд. Лемешко К. А., 2010. 200 с.

Информация об авторе

Пузанков Леонид Александрович, член Российского телеграфного клуба, Симферополь, Крым, Российская Федерация.

Information about the author

Leonid A. Puzankov, Member of the Russian Telegraph Club, Simferopol, Crimea, Russian Federation.



Рис. 1. Михаил Мызников проверяет аппаратуру перед стартом.

Fig. 1. Mikhail Myznikov checks the equipment before starting



Рис. 2. Крымский спортсмен
по «охоте на лис» Виктор Гресь.

Fig. 2. Crimean “fox hunter”
Victor Gres



Рис. 3. Чемпион Украины
по «охоте на лис» Анатолий Рыженко.

Fig. 3. Champion of Ukraine in “fox hunting”
Anatoly Ryzhenko



Рис 4. Главный конструктор аппаратуры,
тренер Николай Бирюков.

Fig 4. The chief designer of the equipment,
coach Nikolay Biryukov



Рис. 5. Тренер крымских спортсменов
Екатерина Ромашкевич.

Fig. 5. Coach of Crimean sportsmans
Yekaterina Romashkevich



Рис. 6. «Золотой» финиш Любы Лебедевой в Республике Корея.

Fig. 6. “Golden” finish of Lyuba Lebedeva in the Republic of Korea



Рис. 7. Спортсмены Крыма по СРП со своими тренерами.

Fig. 7. Crimean sportsmen in sports radio direction with their trainers

УДК 621.396(091)

Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 2¹

¹ Ермолов П. П., ² Коломийченко В. П., ¹ Свиридова Е. И.

¹ Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, д. 33, Севастополь, Российская Федерация, 299053
p.p.yermolov@mail.ru

² Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова
ул. Дыбенко, д. 1а, Севастополь, Российская Федерация, 299028
v.p.kolomiychenko@mail.ru

Получено: 13 августа 2019 г.

Отрецензировано: 9 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Статья представляет собой фрагменты интервью, взятого у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE в Горжье, Швейцария, 13 июля 2017 г. Из 14-ти разделов интервью в статье представлены следующие два: Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича и Советский Союз после Сталина. В статье устранены библиографические несоответствия. Цель публикации — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.

Ключевые слова: Центр истории IEEE в Горжье, В. Л. Бонч-Бруевич, Советский Союз после Сталина.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ермолов П. П., Коломийченко В. П., Свиридова Е. И. Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 2 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 257—263.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Ермолов, П. П. Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 2 / П. П. Ермолов, В. П. Коломийченко, Е. И. Свиридова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 257—263.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

IEEE oral history project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 2

P. P. Yermolov¹, V. P. Kolomiychenko², and Ye. I. Sviridova¹

¹ Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, Russian Federation, 299053

p.p.yermolov@mail.ru

Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov

1a, Dybenko Str., Sevastopol, Russian Federation, 299028

v.p.kolomiychenko@mail.ru

Received: August 13, 2019

Peer-reviewed: September 9, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The article is a fragment of an interview taken by Academician Yu. V. Gulyaev by the IEEE History Center in Gorgier, Switzerland, July 13, 2017. Of the 14 interview sections, the article presents the following two: The dissertation under the guidance of prof. V. L. Bonch-Bruyevich and the Soviet Union after Stalin. The article eliminated bibliographic inconsistencies. The purpose of the report is to familiarize in this part of the profile Russian-speaking community with the main provisions of the interview.

Keywords: Center for IEEE History in Gorgier, V. L. Bonch-Bruyevich, Soviet Union after Stalin.

For citation(IEEE): P. P. Yermolov et al. “IEEE oral history project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 2,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 257–263, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.23

1. Введение

Концепт устной истории был популяризирован в США в 1940-е годы в связи с деятельностью американского журналиста Джо Гулда (Joseph Ferdinand Gould; 1889—1957), заявлявшего о своей работе над огромной книгой «Устная история нашего времени», полностью составленной из записи рассказов разных людей. В 1948 году центр устной истории был открыт при Колумбийском университете. В 1967 году была создана Ассоциация устной истории США, двумя годами позже аналогичная организация появилась в Великобритании.

Не остался в стороне от этого тренда и IEEE — к настоящему времени американским Институтом инженеров электротехники и электроники

собрано 804 персональных устных истории. Подавляющее большинство персоналий в этом собрании — известные американские и «западные» специалисты. И, тем не менее, весьма значимым является то, что в этом списке появился известный российский ученый, академик Ю. В. Гуляев.

Интервью у российского академика для Центра истории IEEE взяли Виктор Плесски (Victor Plessky) и Клеменс Руппель (Clemens Ruppel) в Горжье, Швейцария (Gorgier, Switzerland) 13 июля 2017 г. (интервью № 784).²

Это событие нашло некоторое отражение только в небольшом интервью на портале «Правда.Ру».³

Интервью состоит из 14 разделов:

- [Детство, семья];
- Образование;
- Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича;
- Советский Союз после Сталина;
- Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.;
- Заведующий лабораторией во Фрязино;
- Волны Блюстейна — Гуляева;
- Другие типы акустических волн;
- Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе;
- Будущие разработки в области акустических волновых технологий;
- Друзья и награды;
- Саратовский институт;
- Углеродные нанотрубки;
- Исследования в области медицины.

Ранее [1] были опубликованы фрагменты интервью, в которых были отражены такие разделы, как «Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.» и «Волны Блюстейна — Гуляева». В настоящей статье представлены еще два раздела швейцарского интервью: «Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича» и «Советский Союз после Сталина». Цель доклада — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.

2. Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича

Ruppel:

Что было дальше после окончания Физтеха в 1958 году?

Гуляев:

После окончания физтеха мне было рекомендовано продолжить обучение в течение следующих трех лет либо в физтехе, либо в Академии

² http://ethw.org/Oral-History:Yury_Gulyaev (дата обращения 13.07.2018).

³ <https://www.pravda.ru/science/02-08-2017/1343721-gulyaev-0/> (дата обращения 13.07.2018)

наук. Я предпочел второй вариант и в 1958 году стал аспирантом Института радиотехники и электроники Академии наук СССР под руководством профессора В. Л. Бонч-Бруевича. Темой моей диссертации было рассмотрение некоторых вопросов рекомбинации носителей в полупроводниках, в частности, рекомбинации на дислокациях. В то же время я почти профессионально продолжал плавать: был членом Всесоюзной спортивной команды «Буревестник» по плаванию и собирался получить высшее спортивное звание «Мастер спорта». В 1958 году я женился. Моя жена была студенткой экономического факультета. В 1959 году у нас родился сын. Моей аспирантской стипендии было недостаточно для содержания семьи, поэтому я был вынужден оставить большой спорт и начал зарабатывать деньги репетиторством: готовил абитуриентов к поступлению в Физтех, МГУ им. М. В. Ломоносова и МИФИ. Я получил государственную лицензию и давал частные уроки. Наша жизнь стала более-менее нормальной.

3. Советский Союз после Сталина

Ruppel:

Когда Никита Хрущев пришел в мир, многое изменилось в вашей жизни?

Гуляев:

Вообще наша жизнь в Советском Союзе после знаменитой речи Никиты Хрущева на XX съезде КПСС с осуждением сталинских чисток коренным образом изменилась. Никто теперь не боялся, что ночью автомобиль мог прийти и забрать в тюрьму, все могли свободно говорить на улицах и т. д. Итак, все мы чувствовали «воздух свободы»: его еще называли «хрущевской оттепелью». В 1960 году я начал работать в ИРЭ АН СССР в должности младшего научного сотрудника, в 1962 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию. Основными достижениями моей диссертации была теория «ударной рекомбинации» носителей в полупроводниках (обратный процесс так называемой «ударной ионизации») и теория рекомбинации носителей на дислокациях [4, 5].

Вскоре появилась возможность поехать в Англию для временной работы (в течение одного года) в одном из университетов. Для этого нужно было пройти некий конкурс, где оценивалось, в том числе, знание английского языка. Вместе с 30-ю другими молодыми специалистами я был рекомендован и в июле 1962 года был приглашен доцентом в Манчестерский университет на физический факультет, который возглавлял лорд Брайан Флауэрс (Brian Flowers), один из создателей британской атомной бомбы. На практике я работал с профессором Сэмюэлем Ф. Эдвардсом (Samuel F.

Edwards) — позже сэром Сэмом — над электронной теорией свойств тяжелых легированных полупроводников с применением интегралов Фейнмана.

Это был чудесный год в моей жизни. Впервые я был за границей в совершенно другом мире и где? В колыбели капитализма — в Англии. Помимо интересной работы в выдающейся команде физиков я снова начал спортивную подготовку и был членом команды по плаванию Манчестерского университета, показывая на дистанции 100 ярдов 3-й результат в команде (первый результат имел бронзовый призер предыдущих Олимпийских игр!). В течение этого года Эдвардс и я опубликовали 2 статьи [4, 5], в которых мы разработали метод наискорейшего спуска для континуальных интегралов Фейнмана и получили общее выражение для проводимости неупорядоченного сильно легированного полупроводника, который позже, другими авторами, был использован в теории полупроводниковых лазеров. Эти статьи цитируются в математических учебниках и являются одними из самых цитируемых моих работ.

Ruppel:

Вернувшись в Москву, Вы начали работать в области акустических волн?

Гуляев:

Вернувшись в СССР, я заинтересовался проблемой преобразования твердотельными приборами энергии постоянного тока в энергию высокочастотных колебаний (микроволн). Конечно, была уже быстро развивающаяся транзисторная технология, но в то время транзисторы не могли работать на микроволновых частотах от 100 МГц до 100 ГГц или более. Все искали мало исследованные физические явления. Одним из таких явлений было усиление акустических волн в пьезоэлектрических полупроводниковых CdS, экспериментально наблюдаемых в [6] в 1961 году. Теоретически этот эффект был предсказан в [7] и независимо в [8] в 1956 году. Этот эффект открыл возможность создания твердотельного аналога известной вакуумной лампы бегущей волны (ЛБВ). Однако вскоре выяснилось, что реализация такого устройства с использованием известных пьезоэлектрических полупроводников (CdS, ZnO и др.) практически невозможна, так как подвижность электронов в таких материалах очень низкая, поэтому следует использовать очень высокие управляющие напряжения, при которых кристаллы могут выгорать.

Размышляя об этой проблеме, я пришел к мысли использовать для усиления поверхностных акустических волн (ПАВ). Распространение ПАВ вдоль поверхности пьезоэлектрика сопровождается волной электрического поля над поверхностью. Этим полем ПАВ может взаимодейство-

вать с электронами в прилегающем к поверхности материале (металле, полупроводнике и т. д.) И наоборот, электрические поля в соседнем материале могут взаимодействовать с ПАВ, распространяющейся вдоль поверхности пьезоэлектрика. Если, например, соседним материалом является полупроводник, в котором существует сверхзвуковой дрейф электронов в направлении распространения ПАВ, то ПАВ будет усилена — в полной аналогии с ЛБВ. Теперь в качестве прилегающего материала можно использовать непьезоэлектрический полупроводник с высокой подвижностью электронов. Эта идея и соответствующий расчет коэффициента усиления я представил в 1963 году на семинаре Бонча-Бруевича. Он сразу оценил физический смысл и практическую ценность этой идеи и предложил мне сообщить об этом на самом престижном в Москве семинаре акад. В. Л. Гинзбурга. Когда в 1964 году я претендовал на доклад на этом семинаре, мне сказали, что есть большая очередь, и на семинар представлен доклад на ту же тему, который подготовил аспирант Гинзбурга Владислав Пустовойт (с которым я не был знаком). Итак, они разместили наши доклады на том же семинаре. Идея в обоих докладах была одинаковой, только мы использовали разные методы расчета. Результаты, конечно, были одинаковыми. После семинара Гинзбург посоветовал нам объединиться и вместе подать заявку сначала на патент на новое устройство, а затем на совместную публикацию. Наконец, мы отправили статью в Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ), где она была опубликована в декабре 1964 года [9].

4. Заключение

Интервью, взятое у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE — свидетельство мирового признания его научных достижений. Не рассмотренные в настоящем докладе фрагменты интервью представляют интерес для дальнейшего ознакомления профильного русскоязычного сообщества с основными его положениями.

Список литературы

- 1 Ермолов П. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 1. В кн. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 1827—1834.
- 2 Бонч-Бруевич В. Л., Гуляев Ю. В. К теории ударной рекомбинации в полупроводниках // Физика твердого тела. 1960. Т. 2, № 3. С. 465—473.
- 3 Гуляев Ю. В. К теории рекомбинации носителей тока на линейных дислокациях в полупроводниках. Физика твердого тела. 1962. Т. 4, № 5. С. 1285—

- 4 Edwards S. F., Gulyaev Y. V. Path Integrals in Polar Co-ordinates // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1964. Т. 279, вып. 1377. С. 229—235.
- 5 Edwards S. F., Gulyaev Y. V. The density of states of a highly impure semiconductor // Proceedings of the Physical Society. 1964. Т. 83, № 3. С. 495—
- 6 Hudson A. R., McFee J. H., White D. L. Ultrasonic Amplification in CdS // Physical Review Letters. 1961. Т. 7, вып. 6. С. 237—239.
- 7 Tolpygo K. B., Uritskii Z. I. On the Theory of Polaron Mobility // Soviet Physics JETP. 1956. Т. 3, № 5. С. 725—731.
- 8 Weinreich G. Acoustodynamic Effects in Semiconductors // Physical Review. 1956. Т. 104, № 2. С. 321—324.
- 9 Gulyaev Yu. V., Pustovoi V. I. Amplification of surface waves in semiconductors // Soviet Physics JETP. 1965. Т. 20, № 6. С. 1508—1509.

Информация об авторах

Ермолов Павел Петрович, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» и заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности Севастопольского государственного университета, Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-9089-974X.

Коломийченко Виктория Павловна, старший преподаватель кафедры физики и общетехнических дисциплин Черноморского высшего военно-морского училища имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация.

Свиридова Елена Игоревна, ассистент базовой кафедры «Инновационная радиоэлектроника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности Севастопольского государственного университета, Севастополь, Российская Федерация.

Information about the authors

Pavel P. Yermolov, Associate Professor at the Department of Radio Electronics and Telecommunications and Head of the Basic Department of Innovative Radio Electronics at the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-9089-974X.

Viktoriya P. Kolomiychenko, Senior Lecturer, Department of Physics and General Engineering, Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation.

Yelena I. Sviridova, Assistant Professor at the Basic Department of Innovative Radio Electronics of the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Клапан Дж. А. Флеминга: предпосылки и его изобретение

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
Россия, 191119, Санкт-Петербург ул. Правды, 13
pvm205@yandex.ru*

Получено: 13 августа 2019 г.

Отрецензировано: 9 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Томас А. Эдисон изобрел первую двухэлектродную электронную лампу, которая, по существу, представляла собой вакуумный диод для использования в низкочастотных цепях. Он не осознал важности сделанного открытия, которое получило название «эффект Эдисона». За него это сделал британский ученый Джон Амброз Флеминг, который переосмыслил этот эффект и применил его для обнаружения «беспроводных» электрических сигналов. Основой этой технологии стал изобретенный Флемингом так называемый «колебательный клапан» (англ. *oscillation valve*).

Ключевые слова: переменный ток, выпрямитель, волномер, цимометр, высокочастотный волномер, ячейка Нодона, выпрямитель Венельта, эффект клапана, волномер Флеминга, клапан Флеминга, соглашение с компанией Маркони.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Клапан Дж. А. Флеминга: предпосылки и его изобретение // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 264—284.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Клапан Дж. А. Флеминга: предпосылки и его изобретение / В. М. Пестриков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 264—284.

Valve J. A. Fleming: background and its invention

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13 Pravda St. Petersburg, 191119, Russia
pvm205@yandex.ru

Received: August 13, 2019

Peer-reviewed: September 9, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *Thomas A. Edison invented the first two-electrode electron tube, which essentially was a vacuum diode for use in low-frequency circuits. He did not realize the importance of the discovery, which was called the “Edison effect”. This was done for him by the British scientist John Ambrose Fleming, who rethought this effect and applied it to detect “wireless” electrical signals. The basis of this technology was invented by Fleming, the so-called “oscillation valve”.*

Keywords: *alternating current, rectifier, wave meter, cimeter, high-frequency wave meter, Nodon cell, Wehnelt rectifier, valve effect, Fleming wave meter, Fleming valve, agreement with Marconi company.*

For citation(IEEE): V. M. Pestrikov, “Valve J. A. Fleming: background and its invention,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 264–284, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.24

1. Введение

В 1899 году Дж. А. Флеминг (John Ambrose Fleming) становится техническим советником компании Marconi и участвует в проекте Poldhu. Целью проекта была передача беспроводного сигнала через Атлантический океан. Для этого проекта он разработал специальную передающую аппаратуру, которая была установлена в Корнуолле (Англия). 12 декабря 1901 года с помощью искровой радиосистемы, созданной Флемингом, была осуществлена передача информации через Атлантику. Во время сеанса был передан кодовый знак «S» азбукой Морзе. На острове Ньюфаундленд Гульельмо Маркони принимал сигнал на проволочную антенну, поднятую высоко в небо бумажным змеем (по другим источникам — воздушным шаром). До сих пор идет спор о том, действительно ли Маркони смог на примитивный радиоприемник с когерером принять сигнал, посланный передатчиком из Англии, или это были атмосферные разряды? О принад-

лежности Флеминга к этому триумфу новых технологий в тот момент не вспоминали, и он жаловался на то, что его имя не упоминалось в период торжеств и в газетных поздравлениях.

Активно участвуя в этом эксперименте, Дж. А. Флеминг чувствовал себя ущемленным из-за сдержанного признания его заслуг самим Г. Маркони, который считал, что его вклад в достигнутый результат явился не определяющим. Дж. А. Флеминг не получил тех лавров славы, на которые он рассчитывал. Из-за этого отношения между ним и Г. Маркони сложились недолжным образом, что и послужило к прекращению консультативных функций Дж. А. Флеминга в *Marconi Company*.

В декабре 1903 года Дж. А. Флеминг был уволен из *Marconi Company*, несмотря на его желание сохранить научное сотрудничество с компанией. В дальнейшем Флеминг направил свои усилия на восстановление связей с компанией *Marconi Co.*, что повлияло на изменение его научно-технических интересов. Он понял, что только новыми результативными научными исследованиями сможет вновь привлечь к себе внимание компании Г. Маркони.

Его интерес к этому периоду времени в значительной степени лежал в области высокочастотных измерений, в частности, длины волны, частоты, числа искр, тока, измерении индуктивности, емкости и сопротивления.

2. Измерение высокочастотного переменного тока

На рубеже XIX и XX веков существовало два разных метода измерения высокочастотного переменного тока. В первом методе использовалось удлинение металлической проволоки при нагревании слабым высокочастотным переменным током. В качестве измерительного прибора использовался термоэлектрический амперметр. В этом приборе переменный ток преобразовывался в постоянный с помощью термопреобразователей, представляющих собой сочетание одной или нескольких термпар и нагревателя.

По второму способу использовались чувствительные динамометры переменного тока, в которых датчик преобразовывал деформацию от воздействия силы в электрический сигнал.

Обычные высокотемпературные амперметры и динамометры обладали малой чувствительностью и не позволяли измерить слабый высокочастотный ток, который был характерен для беспроводной телеграфии. В связи с этим Флеминг разработал третий метод, в котором использовался эффект намагничивания железа электромагнитными волнами.

Намагниченность куска размагниченного железа, а также размагничивание части намагниченного железа электромагнитными волнами было обнаружено Э. Резерфордом в 1896 году. Основываясь на этом, Маркони изобрел практическую конструкцию магнитного детектора в 1902 году. В магнитном детекторе Маркони использовал телефон, а не гальванометр, так как обычные гальванометры постоянного тока не могли обнаружить высокочастотные сигналы переменного тока.

В декабре 1902 года Флеминг и его ассистент А. Блок (A. Blok) решили исследовать возможность практического использования эффекта Резерфорда с применением гальванометра. Принцип работы, который они пытались реализовать, был прост. Они предположили, что после размагничивания железа электромагнитными волнами его можно снова намагнитить каким-либо другим способом. Тогда бы эффект воздействия электромагнитных волн можно было зафиксировать на магнитном детекторе обычным гальванометром постоянного тока. Если бы электромагнитные волны производили только одностороннее воздействие (либо намагничивание, либо размагничивание), то в этом случае появляется возможность его преобразования в электрический сигнал. Сигнал такой природы можно зафиксировать с помощью гальванометра постоянного тока. После долгих проб и ошибок, Флеминг и Блок создали работоспособное устройство, которое называли «цимоскоп» (англ. *cymoscope*), рис. 1. Флеминг описал его в статье, опубликованной в марте 1903 года [1].

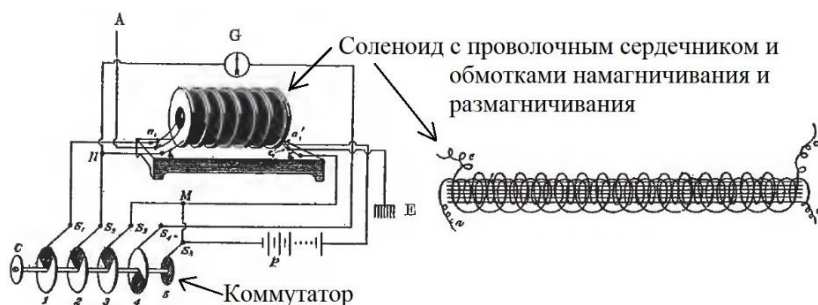


Рис. 1. Конструкция магнитного цимоскопа Флеминга для измерения длин волн Герца [2].

Fig. 1. The design of the Fleming magnetic cymoscope for measuring Hertz wavelengths [2]

Разработанное устройство позволяло выпрямлять высокочастотный переменный ток, который после преобразования его в постоянный ток, можно было измерить обычным гальванометром.

Здесь важно заметить, что магнитный цимоскоп Флеминга — Блока был не просто детектором в обычном смысле, а скорее представлял собой

лабораторный инструмент, своего рода измерительный высокочастотный гальванометр переменного тока. Это устройство, используемое в качестве выпрямителя, было очень громоздким и менее эффективным, чем большинство обнаружителей высокочастотных колебаний (детекторов), доступных в то время.

Флеминг надеялся, что цимоскоп, найдет широкое применение в связи с разработкой излучателей и передатчиков беспроводной телеграфии для волн Герца. В тот период времени, как правило, было трудно установить, является ли улучшение передачи радиосигнала следствием случайного увеличения чувствительности когерера или какого-либо изменения или изменения, сделанного в передатчике.

Цимоскоп Флеминга — Блока, однако, не получил широкого распространения из-за малой стабильности коммутатора, что влияло на калибровку всего устройства. За пределами инженерной лаборатории Флеминга в Университетском колледже устройство использовалось только итальянским ученым В. Бушеми (Vincenzo Buscemi) для изучения поглощения электромагнитных волн в различных диэлектриках [3].

После этого несовершенного устройства Флеминг разработал более чувствительные амперметры, которые были настроены на высокую частоту. Однако они обладали недостаточной чувствительностью при измерении слабых токов менее 5 мА, а это как раз те электрические токи, которые радиоинженеры часто измеряли в лаборатории и в условиях эксплуатации аппаратуры [4].

3. Высокочастотный волномер — цимометр

В январе 1903 года Флеминг пришел к необходимости разработать более совершенный прибор для количественного измерения энергии радиоволн. «Только обладая таким инструментом, — сказал он, — мы можем надеяться на правильность изучения передающей мощности различных передатчиков или эффективности различных форм антенн или устройств, с помощью которых создается волна» [5]. Измерение мощности передатчиков было основной целью Флеминга в этот период времени. При разработке прибора для измерения длины радиоволн он использовал некоторые результаты эксперимента австрийского физика Эрнста Лехера (Ernst Lecher, 01.06.1856—19.07.1926). В 1888 году Э. Лехер разработал методику измерения длины и частоты электрических волн на основе пары параллельных проводов (*L*-провода или англ. *L-wires*).

В приборе, который Флеминг назвал «цимометр» (англ. *cymometer*), вместо проводов использовался длинный соленоид, намотанный на эбони-

товый каркас, рис. 2. Соленоид имел подвижной контакт (ползунок) для регулировки индуктивности. Один конец соленоида соединялся через конденсатор с антенной передатчика, а его подвижной контакт — с землей. Из-за колебаний напряжения в антенне, волны напряжения распространялись по соленоиду.

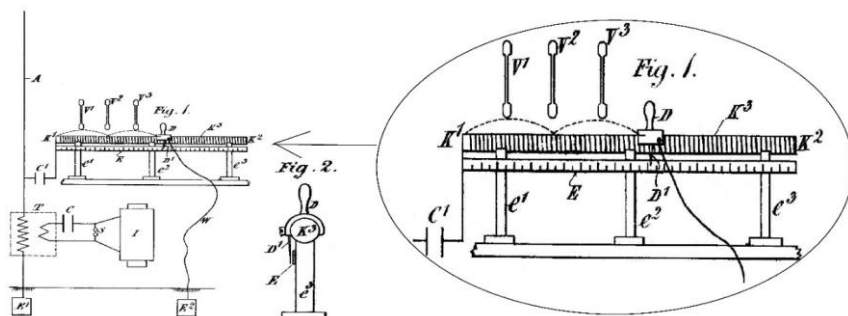


Рис. 2. Конструкция волномера Флеминга под названием цимометр (англ. *cymometer*). 1904 г.
 Рисунок из патента Флеминга [6].

Fig. 2. The design of the Fleming wavemeter called a cymometer. 1904.
 Figure from Fleming's patent [6]

Цимометр представлял собой разновидность поглощающего волномера, в котором с помощью скользящего контакта (ползунка) отыскивалось такое его положение (резонанс), при котором происходит взаимодействие появившейся отраженной волны с приходящими волнами. В результате этого возникают синусоидальные стоячие волны напряжения и тока в соленоиде. Напряжение падает до нуля в узлах, расположенных на расстоянии, кратном половине длины волны от конца соленоида. Максимумы напряжения, называемые пучностями, расположены на полпути между узлами.

Длина волны определялась непосредственно по измерению расстояния между узлами, а, поскольку скорость волн в спирали известна, то частота колебаний в антенне вычислялась по емкости и индуктивности на единицу длины. Для обнаружения присутствия узлов использовались три тонкие стеклянные вакуумные трубки $V1$, $V2$, $V3$, которые имели на концах шарики. Трубки заполнялись разреженным газом, в качестве которого брался водород, гелий и т. д., но предпочтение отдавалось неону. Также было желательно, чтобы стекло было сделано флуоресцентным и содержало в своем составе уран. Такая трубка светилась при размещении вблизи точки соленоида, потенциал которой не равен нулю, то есть в точке резонанса. Неон, как и другие разреженные газы, в тлеющем разряде может светиться только при воздействии электрического поля и не светится под действием магнит-

ного поля. В устройстве между антенной и соленоидом был установлен большой металлический экран, чтобы предотвратить влияние излучаемых непосредственно антенной волн на стационарные волны в соленоиде.

Во время исследований длину волны λ вычисляли по формуле

$$\lambda = \frac{2l}{n-1},$$

где l — расстояние между первой и последней с номером n пучностями (или узлами).

Частота f определялась по известной формуле:

$$f = c/\lambda, \text{ где } c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с — скорость света.}$$

Для измерений обычно использовались узлы, так как они проявляются более острее, чем пучности, соответственно и точность измерений получается выше.

В июне 1904 года Флеминг подал заявку для получения патента на новую конструкцию волномера под названием «цимометр» [6], рис. 3.

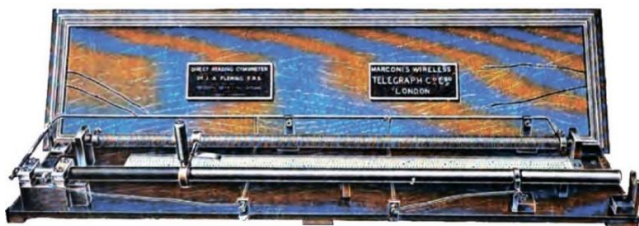


Рис. 3. Общий вид промышленной конструкции волномера (цимометра) Дж. А. Флеминга. 1904 г.

Fig. 3. General view of the industrial design of the wavemeter (cymometer) J. A. Fleming. 1904

Маркони и другие экспериментаторы до появления волномера (цимометра) Флеминга имели только приблизительные представления о значениях частот своих передатчиков. Позже Генри Раунд и другие радиоинженеры разработали более компактные волнометры (англ. *wavemeters*), которые охватывали более широкий диапазон частот. Флеминг, который никогда не терпел соперников, с раздражительностью жаловался Маркони, что «эти молодые люди читают мои книги, а затем делают вид, что делают изобретения».

Цимометр Флеминга длительное время использовался в практической беспроводной телеграфии, а изучение методики его использования входило в программы радиошкол Маркони¹, рис. 4.

¹ В 1897 году была образована компания Marconi Wireless Telegraph & Signal, а спустя 4 года она открыла свою первую школу по обучению радиосвязи (Marconi School of Wireless) в Эссексе (Essex, England). После была создана сеть школ для обучения операторов, обслуживающих мировые океаны.

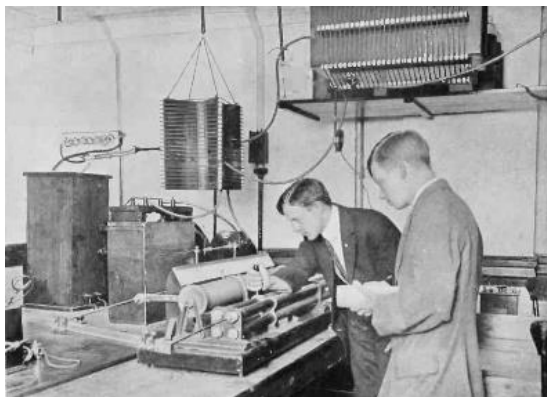


Рис. 4. Изучение работы цимометра Флеминга в школе Маркони. Нью-Йорк. 1912 г.
Fig. 4. Studying the work of the Fleming cymometer at the Marconi school. New York. 1912

4. Поиск конструкции высокочастотного выпрямителя

Сконструированные Флемингом приборы для измерения высокочастотного переменного тока оказались очень сложными в эксплуатации. Помимо прочего, для определения искомой величины требовались аналитические вычисления. Это стало одной из причин того, что он решил позаимствовать некоторые технологии, относящиеся к выпрямлению переменного тока в электротехнике.

Преобразование переменного тока в постоянный являлось важным вопросом в энергетике. В энергетике в это время, широко использовалось несколько типов выпрямителей, в частности, механический и электролитический. Из двух названных выпрямителей для решения проблемы, очевидно, более перспективным выглядел электролитический выпрямитель. Механический выпрямитель ввиду своей громоздкости для достижения поставленной цели не подходил [7].

В октябре 1904 года в английском научно-техническом журнале «Electrician» появилась статья французского инженера-химика Альберта Нодона (Albert Nodon, 1862—1934) под названием «Электролитический выпрямитель: экспериментальное исследование» [8]. В этой статье приводится описание эффективно работающих выпрямителей, сконструированных на базе алюминиевых ячеек Нодона. Ячейка Нодона состояла из двух полосок разнородных металлов (алюминий и железо), которые были погружены в электролит, например, карбонат аммония. При переменном токе частотой 42—82 Гц было получено эффективное выпрямление низкочастотного переменного тока при к. п. д. 65—75 %. В статье автор представ-

вил свой выпрямитель как электролитический «клапан»² (англ. *valve*). Нодон на это изобретение получил патенты у себя на родине, а также за рубежом, в Германии, Великобритании и США, рис. 5 [9—11].

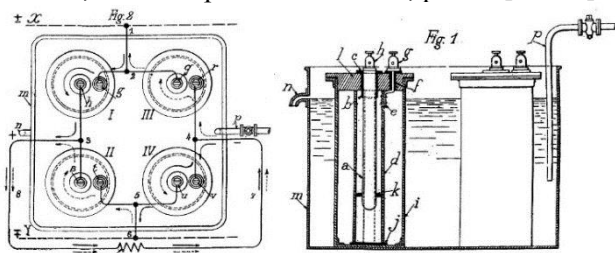


Рис. 5. Устройство клапана Нодона и схема выпрямителя из 4-х таких клапанов [10]. 1902 г.

Fig. 5. The device Nodon valve and rectifier circuit of 4 such valves [10]. 1902

Нужно заметить, что работа выпрямителя Нодона основывается на открытии, сделанном в 1857 году немецким химиком Иоганном Генрихом Буффом (нем. *Johann Heinrich Buff*, 23.05.1805—24.12.1878). Буфф установил, что через электролит, в котором один из электродов выполнен из алюминия, а другой — из свинца, электрический ток проходит только тогда, когда алюминий служит катодом, при условии, что разность потенциалов у электродов не превышает известного предела. Так, пара металлов алюминий — свинец (или железо), погруженных в электролитический раствор, пропускают переменный ток только в одном направлении, что позволяет использовать этот эффект для выпрямления переменного тока в постоянный, рис. 6. 4 января 1898 года М. Пупин подал заявку на получение патента на использование электролитического клапана [12].

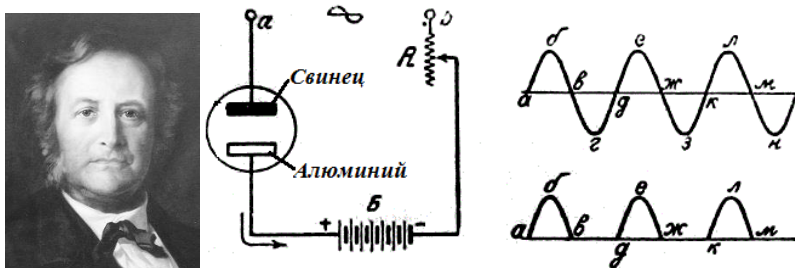


Рис. 6. Иоганн Генрих Буфф (1840), схема однополупериодного выпрямителя на клапане Нодона и кривые выпрямленного тока (справа).

Fig. 6. Johann Heinrich Buff (1840), the scheme of a half-wave rectifier on the Nodon valve and the curves of the rectified current (right)

² В английском языке *valve* означает — клапан, вентиль; на французском *valvule* — клапан, в статье Нодона на французском языке *souppapes electroquies* — электроклапан; на немецком *ventiln* — вентиль.

Флеминг решил применить клапан Нодона для выпрямления высокочастотных колебаний беспроводной телеграфии при измерениях гальванометром постоянного тока. После большого количества экспериментов он в конце концов обнаружил, что клапан Нодона неэффективен для выпрямления высокочастотного переменного тока, так как был разработан для энергетики, в частности, заряда промышленных аккумуляторов [13].

Невзирая на это, проведенное исследование с электролитическим клапаном Нодона позволило Флемингу переосмыслить механизм эффекта Эдисона. В ранних его работах односторонняя проводимость в эффекте Эдисона была объяснена Флемингом с точки зрения испускания отрицательно заряженных молекул углерода от нити накала лампы до добавленного в нее второго электрода. При подключении к этому электроду гальванической батареи он функционировал как разрядник отрицательных зарядов, накопленных на нем, а гальванометр в схеме измерял скорость этого разряда.

В 1904 году Флеминг стал трактовать механизм эффекта Эдисона совершенно по-другому. Батарея, включенная в цепь второго электрода, функционировала как источник ускорения движения электронов в вакууме, а гальванометр измерял скорость этого потока электронов. Односторонняя проводимость трансформировалась в действие клапана [14].

5. Ламповый выпрямитель Венельта

Отрицательный результат в эксперименте с клапаном Нодона заставил Флеминга задуматься о создании других конструкций устройств, обладающих эффектом клапана (выпрямления) для высокочастотных колебаний.

Ему было необходимо устройство, которое допускало только одностороннее движение электрического тока. Как он нашел такое устройство, Флеминг рассказал в своих мемуарах, вышедших в 1934 году [15]. В момент раздумий он вспомнил об односторонней проводимости в небольшом пространстве внутри лампы Эдисона, явление, которое исследовал несколько раз в 1880-х и 1890-х годах и подумал: «А почему бы не попробовать?»

Возможности практического использования двухэлектродной вакуумной лампы для выпрямления низкочастотных переменных токов были известны еще до Флеминга. Немецким физиком Артуром Венельтом (Arthur Rudolph Berthold Wehnelt) был изготовлен и запатентован вакуумный диод для выпрямителей, предназначенных для зарядки автомобильных аккумуляторов.

В статье Венельта, вышедшей в 1906 году [16], отмечается, что «...недавняя публикация господина Дж. А. Флеминга в *Proceedings of the Royal Society* (1905) [13] о его экспериментах, которые, вероятно, были проведены, под влиянием моей публикации в *Annalen der Physik* (1904) [17]. В 1904 году я работал с подобной лампой (рис. 7), описанной мною в статье в том же году. Только господин Флеминг вместо нити накала, покрытой оксидом в моей лампе, использовал углерод, который, как известно, также испускает отрицательные электроны, но в меньшей степени, чем при покрытии одним из указанных мной оксидов. Господин Флеминг отмечает, что такие лампы могут использоваться в качестве детекторов волн в беспроводной телеграфии, что по полученным мной результатам с электрическими волнами было само собой разумеющимся».

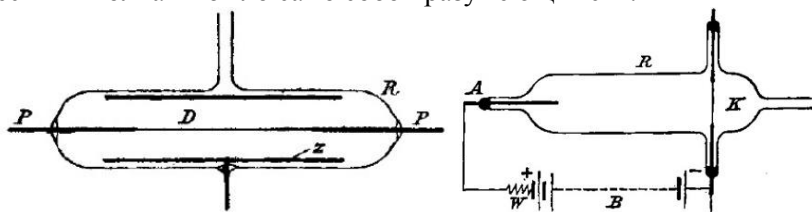


Рис. 7. Ламповые диоды Венельта [17]. 1904 г.

Fig. 7. Tube diodes Venelt [17]. 1904

Заметим, что высказывание Венельта об использовании лампового диода для выпрямления высокочастотных колебаний было сделано только через 2 года после получения патента Флемингом. Сам же Венельт вообще не пытался этого сделать, даже в заявке на патент в январе 1904 года указывается двухэлектродная вакуумная лампа только в качестве преобразователя переменного тока в постоянный [18]. В этом патенте не упомянуто использование устройства для обнаружения радиоволн, что не позволило Венельту в дальнейшем продать свое изобретение.

6. Изобретение лампового волномера

Флеминг, стремясь реализовать идею лампового выпрямителя, попросил своего помощника Г. Б. Дайка (G. B. Dyke) собрать схему (рис. 8) в соответствии с инструкциями и «вынул из шкафа одну из своих экспериментальных лампочек» для использования в эксперименте [15]. Схема включала два колебательных контура — один с двумя лейденскими банками (конденсаторами) и катушкой Румкорфа, а другой, такой же, но с подключенным к нему клапаном Флеминга с гальванометром постоянного тока и гальванической батареей.

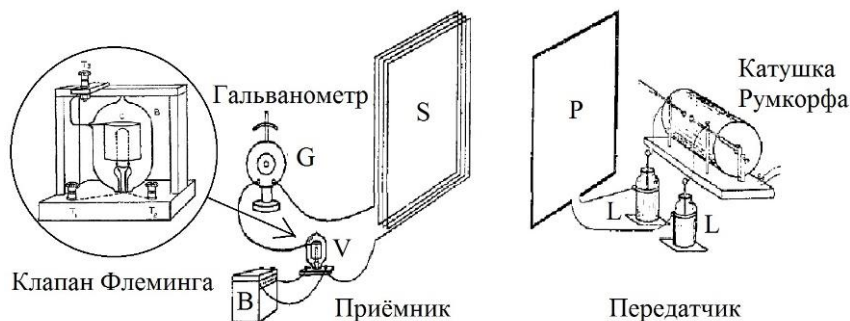


Рис. 8. Эксперимент с клапаном Флеминга в качестве выпрямителя высокочастотных колебаний [19].

Fig. 8. An experiment with a Fleming valve as a high-frequency oscillation rectifier [19]

Оба контура были настроены на одну частоту. Впоследствии Флеминг вспоминал: «Это было около пяти часов вечера, когда постройка радиоустройств была закончена. Я, конечно, больше всего стремился как можно быстрее все проверить, не теряя времени. Как только в лаборатории мы установили два контура на некотором расстоянии друг от друга, я начал создавать колебания в первом контуре. К моему восхищению я увидел, что стрелка гальванометра указала устойчивое прямое прохождение тока, а отсюда и решение проблемы выпрямления высокочастотных беспроводных токов с помощью специальной электронной лампы. Необходимая деталь для радиосвязи была найдена. Это была электронная лампа. Я сразу увидел, что металлическая пластина должна быть заменена металлическим цилиндром, окружающим всю нить, чтобы собирать все электроны, прилетающие к нему. У меня было много ламп, содержащих угольные нити накала и металлические цилиндры, которые использовались для выпрямления высокочастотных токов беспроводной телеграфии. Этот инструмент я назвал «клапан колебаний» (oscillation³ valve)» [15].

После этого первоначального названия вскоре появились альтернативные названия, такие как клапан Флеминга (англ. *Fleming's valve*), вентиль Флеминга, вакуумная трубка, термоэлектронный клапан, пустотный клапан, вакуумный диод и др. Можно предположить, что Флеминг после изучения работ Нодона позаимствовал у него не только ряд указанных терминов для названия своего пустотного клапана, но также использовал и другие понятия, такие как «эффект клапана» (англ. *valve effect*) и «действие клапана» (англ. *action of the valve*).

³ Oscillation — рус. колебание, вибрация, генерирование

После проведения эксперимента ученый пришел к выводу, что устройство, состоящее из нити накала и холодной металлической пластины (анода), может быть использовано как выпрямитель высокочастотных токов при определении длин электромагнитных волн высокой частоты, рис. 9.

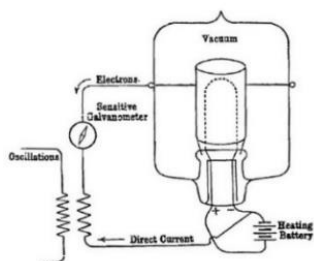


Рис. 9. Схема волномера на клапане Флеминга [20].

Fig. 9. Circuit of the wavemeter on the Fleming valve [20]

Успешно проведенный эксперимент позволил Флемингу подать заявку и получить британский патент на «Improvements in Instruments for Detecting and Measuring Alternating Electric Currents» (Усовершенствование устройств для обнаружения и измерения переменных электрических токов) с приоритетом от 16 ноября 1904 года [21]. В патенте отмечалось, что «данное изобретение относится к некоторым новым и полезным устройствам для преобразования альтернативных электрических токов и особенно высокочастотных переменных электрических токов или электрических колебаний в постоянные электрические токи с целью их обнаружения и измерения с помощью обычных инструментов постоянного тока, таких как как «зеркальный гальванометр» обычного типа или любой обычный прамоточный амперметр тока.

В патенте Флеминга указывается, что «целью изобретения является разработка устройства, с помощью которого обычный гальванометр может быть использован для обнаружения и измерения переменного электрического тока и особенно высокочастотных переменных токов, обычно известных как электрические колебания».

В тексте патента не содержится информации о проблемах с существовавшими тогда детекторами и нет намек в потребности новых детектирующих устройствах. Подчеркивается, что механический или электролитический выпрямители неприменимы для высокочастотных токов, а также то, что алюминиево-углеродная ячейка не будет функционировать с переменными высокочастотными токами.

О главном, ради чего так много работал Флеминг, он написал: «Я обнаружил, что если два проводника заключены в сосуд, в котором сделан хороший вакуум и один из них нагревается до высокой температуры, то

пространство между горячим и холодным проводниками обладает односторонней электропроводностью, а отрицательное электричество может переходить от горячего проводника к холодному проводнику, но не в обратном направлении» [15].

Следует отметить, что патент Флеминга относится исключительно к изобретению волномера, хотя в нем и приведена схема (Fig. 1) использования вакуумного клапана в беспроводной телеграфии, рис. 10. Эту схему следует рассматривать как пример того, что при измерении определенной частоты, низкой или высокой, следует выбирать соответствующую конструкцию антенного провода n . Это подтверждается текстом патента: «Вышеописанная колба с несколькими нитями накала и гальванометром может быть использована в качестве приемного прибора в беспроводной телеграфии. В этом случае антенный приемный провод подключается к катушке связи входного контура, а один из вышеописанных электрических клапанов и гальванометр включаются во вторичную обмотку катушки входного контура. Слабые переменные токи, возбуждаемые антенной электрическими волнами, затем фиксируются на шкале гальванометра».

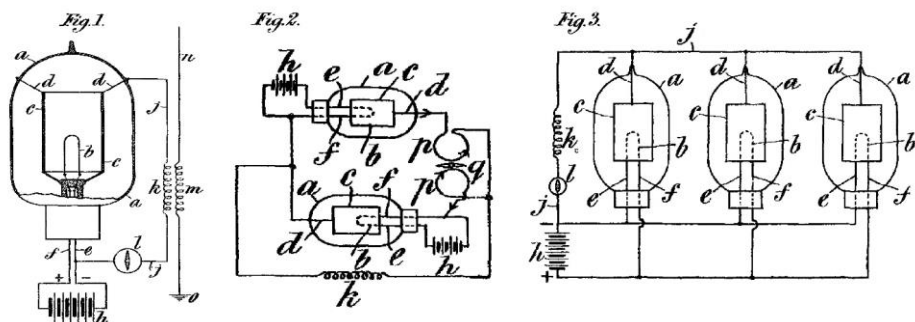


Рис. 10. Принципиальные схемы устройств преобразования переменного электрического тока в постоянный ток. Из патента А. Флеминга GB24850. 16 ноября 1904 года

Fig. 10. Schematic diagrams of devices for converting alternating electric current into direct current. From A. Fleming's patent GB24850 on November 16, 1904

В патенте, несмотря на то, что клапан предлагалось изготавливать с углеродной нитью накала, подобно той, что использовалась в то время в электрических лампочках, он указал на возможность ее замены металлической нитью. Одна или несколько нитей углерода могут быть заменены петлей из платиновой проволоки, что и было подтверждено в экспериментах Дж. А. Флеминга. В первоначальной патентной заявке, поданной в 1904 году, он предполагал, что в баллоне лампы может вообще не содержаться газ.

Особенностью запатентованного устройства явилось то, что в схеме волномера с пустотным клапаном принятый электрический сигнал фиксировался визуально с помощью зеркального гальванометра. Градуировка волномера могла быть произведена с помощью цимометра. Как показали дальнейшие исследования, клапан Флеминга обладал большей чувствительностью, чем использовавшиеся тогда когереры.

Патент на волномер в Великобритании Дж. А. Флеминг получил 15 августа 1905 года [21]. В том же 1905 году были получены патенты в США (US803684), Германии (DE186084C), Канаде (CA98083) и других странах. Нужно отметить, что в английском и американском патентах графическая часть одна и та же, но они имеют некоторые отличия только в текстовой части, в частности в названии изобретения. Так, название американского патента звучит следующим образом: «Instrument for converting alternating electric currents into continuous currents» (Прибор для преобразования переменного электрического тока в постоянный). Почти такое же название у канадского патента: «Instrument for converting alternating currents into continuous currents» (Прибор для преобразования переменного тока в постоянный).

7. Возобновление Флемингом взаимоотношений с Гульельмо Маркони

Изобретение вакуумного клапана и цимометра стало весомым аргументом для Флеминга в попытке восстановления его научных контактов с Маркони, а также с его компанией. Флеминг после подачи заявки на получение патента на клапан написал письмо Маркони. В этом недатированном письме (написанном в конце ноября 1904 г.) он впервые упомянул о своем изобретении измерителя длины волны (цимометр), а затем заметил:

«Я нашел способ выпрямления электрических колебаний, т. е. потока электричества в одном направлении, так что я могу обнаружить его с помощью обычного зеркального гальванометра. Я принимаю сигналы на антенну, но только зеркальный гальванометр и мое устройство в настоящее время существуют в лабораторном масштабе. Это открывает широкое поле для работы, так как теперь я могу точно измерить эффект передатчика».

Затем Флеминг заверил Маркони, что «я еще об этом никому не говорил, так как это может быть очень ценным» [22].

Новые изобретения Флеминга произвели большое впечатление на Маркони, который выразил желание провести некоторые эксперименты с «выпрямителем электрического тока» конструкции Флеминга. Флеминг

предложил изготовить свое устройство на заводе Маркони в Челмсфорде (Chelmsford), куда Маркони «мог прийти в удобное время для ознакомления».

В своей пятничной лекции 3 марта 1905 года Маркони продемонстрировал цимометр и клапан Флеминга. После лекции Маркони спросил Флеминга, можно ли у него одолжить клапан для дальнейших экспериментов [23]. Так появилась возможность для Флеминга восстановить и упрочить связь с Маркони, которую он постарался не упустить. Флеминг сразу ответил Маркони:

«Единственный клапан, который у меня есть и который хорошо работает — это тот, который я одолжил Вам для Вашей лекции, и с которым была проделана вся работа для моей статьи в Royal Society.

Я не хочу расставаться с этим клапаном, поскольку у меня не будет никаких возможностей для проведения сравнительных измерений. Я постараюсь сделать пару хороших клапанов как можно скорее и отправлю Вам. Между тем хотел бы обратить Ваше внимание на вопрос о моем соглашении с компанией, о котором я говорил с Вами при нашей последней встрече. В Ваше отсутствие я надеюсь, что рассмотрение этого вопроса не затянется, так как в интересах компании он должен быть решен» [24].

Несколько месяцев спустя, в мае 1905 года, компания Маркони повторно назначила Флеминга своим научным консультантом, начиная с первого числа этого же месяца. Между двумя директорами компании и Флемингом был подписан документ о согласии. Соглашение содержало четыре пункта. В третьем пункте указывалось на то, что изобретения Флеминга, сделанные между 1 декабря 1903 года и 1 мая 1905 года, явились результатом работы Флеминга, как если бы он был научным консультантом в этот период времени. Другими словами, все, что изобрел Флеминг в прошедший период времени, является интеллектуальной собственностью компании Маркони.

В соглашении, в частности, отмечено, что Джон Амброз Флеминг должен время от времени и в любое время в течение периода с 1 мая 1905 по 30 апреля 1908 гг. сообщать компании обо всех предполагаемых открытиях и изобретениях, которые он намерен сделать в дальнейшем, а также представлять по запросу компании информацию об их полной стоимости или ее части, которая связана с бизнесом компании, при этом прилагать максимальные усилия по бесплатному использованию эквивалентов иностранных патентов в странах, где компания может иметь отношение к открытиям и изобретениям (независимо от того, были ли они сделаны или доведены до его сведения в настоящем документе с момента исте-

чения первого вышеупомянутого периода в три года с первого дня 1 декабря 1900 года или могут быть сделаны или доведены до его сведения в дальнейшем в течение периода действия настоящего Соглашения) [25].

Патент на клапан был выдан на имя Флеминга, но, невзирая на это, компания Marconi согласно достигнутому соглашению, теперь имела на него все права. В течение следующих нескольких лет, примерно до 1907 года, Флеминг, а не Маркони, заказывал изготовление клапанов в мастерской компании Ediswan в Ponders End⁴. В компании Ediswan этим занимался друг Флеминга, опытный мастер по изготовлению электроламп Чарльз Гимингам (Charles Gimingham). Он делал клапаны в соответствии с инструкцией Флеминга.

Всякий раз, когда Маркони и его компания просили Флеминга предоставить им клапаны, то заказывал их Флеминг, а его помощник Г. Б. Дайк доставлял продукцию в компанию Маркони. Использование клапанов в этот период времени не было под контролем Флеминга.

В конце 1906 года один итальянский профессор спросил Флеминга: «Может ли он получить клапан для научных экспериментов?» Флеминг, взял паузу, чтобы рассказать об этом Маркони. Маркони отказался давать клапаны другим, исходя из необходимости их использования в качестве детектора беспроводного телеграфа в своих текущих экспериментах. Однако Флеминг заметил, что даже если вы хотите сохранить эксклюзивное использование клапана для беспроводной телеграфии, все равно можно будет поставлять его для иных научных целей, которые не противоречат вашей работе [26]. В 1907 году Маркони решил передать несколько клапанов итальянскому правительству, в связи с чем попросил Флеминга предоставить инструкции по их использованию итальянцам.

8. Дальнейшие эксперименты Флеминга с пустотным клапаном

Флеминг, несмотря на потепление отношений с компанией Маркони, продолжил экспериментировать с пустотным клапаном как выпрямителем высокочастотных колебаний. Он экспериментально опробовал различные формы анодов. Изменяя форму второго дополнительного электрода, он согнул металлическую пластину в виде цилиндра, который расположил таким образом, что чтобы нить накала оказалась внутри его. После соединения металлического цилиндра с положительным электродом он обнаружил, что в этом случае гальванометр показывает самый большой электрический ток в сравнении с другими типами и положениями элект-

⁴ Ponders End — район городка Энфилд, расположенного в северной части большого Лондона

тров. Флемингу стало ясно, что металлический цилиндр с положительным потенциалом способен улавливать наэлектризованные частицы, которые вылетают из разогретой нити накала.

Двухэлектродная лампа Флеминга представляла собой стеклянный баллон, в нижнюю часть которого впаивалась нить накаливания. Вокруг нее располагался дополнительный электрод в виде металлического цилиндра, рис. 11. Внутри баллона давление воздуха составляло 0,01 мм рт. ст. Цилиндр получил название «анод», а нить накала — «катод».

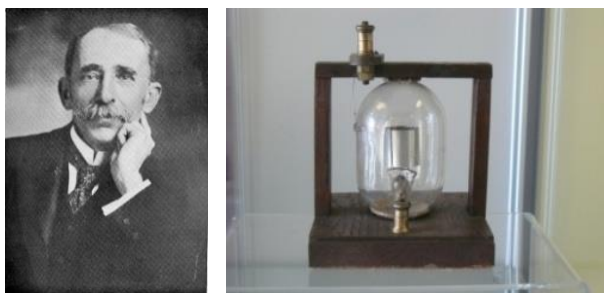


Рис. 11. Дж. А. Флеминг и одна из первых его конструкций пустотного клапана при исследовании эффекта Эдисона (около 1889 г.).

Fig. 11. J. A. Fleming and one of his first hollow valve designs in the study of the Edison effect (circa 1889)

В начале 1905 года в трудах Лондонского королевского общества вышла статья Дж. А. Флеминга о применении вакуумного клапана для преобразования электрических колебаний [27]. В статье приводятся основные положения из патента Флеминга [21] о том, что электролитический выпрямитель, в частности, элемент Нодона не подходит для выпрямления высокочастотных токов. Это и явилось тем фактором, который заставил автора статьи вернуться к продолжению исследований по односторонней проводимости в двухэлектродной вакуумной лампе. Для исследований были взяты двухэлектродные лампы различной конструкции, рис. 12.

Эксперименты показали, что указанные двухэлектродные лампы могут быть использованы в качестве электрического клапана для выпрямления переменных электрических токов различной частоты.

В статье отмечается, что лучше для этих целей подходит пустотный клапан с цилиндрическим анодом. Электронная лампа с таким анодом имела следующие характеристики: напряжение углеродной нити (длина 4,5 см, диаметр 0,5 см, площадь поверхности 70 мм²) напряжение накала — 12 В при токе 2,7—3,7 А, анод — алюминиевый цилиндр диаметр 2 см, высота — 2 см, площадь поверхности — 12,5 см².

Если металлический цилиндр охлаждать проточной холодной водой, то выпрямление переменного тока достигнет 100 % или будет полным. Из этого следует, что идеальный и совершенный выпрямитель для электрических колебаний может быть построен путем включения углеродной нити накала и холодного металлического анода в стеклянную колбу с высоким вакуумом.

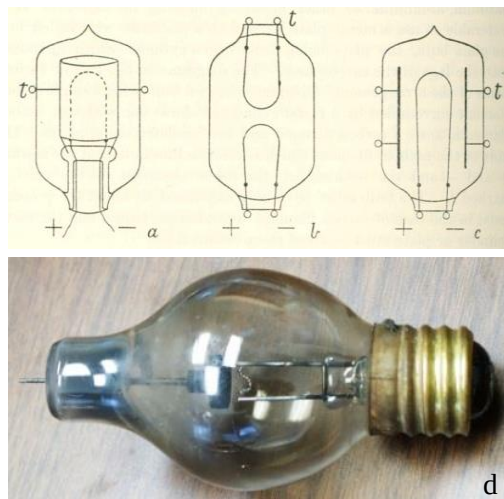


Рис. 12. Устройство двухэлектродных вакуумных электронных ламп в научных исследованиях А. Флеминга (a, b, c) и одна из ранних конструкций вентиля с анодом в виде диска. 1910 г. (d).

Fig. 12. Arrangement of two-electrode vacuum electron tubes in A. Fleming's scientific research (a, b, c) and one of the earliest valve designs with an anode in the form of a disk in 1910 (d)

Для получения более полного преобразования переменного тока в постоянный предлагается использовать дифференциальный гальванометр и два вакуумных клапана. Исходя из этого приводится схема такого волномера, рис. 13. Нужно заметить, что такая же схема есть у Флеминга и в его патенте [21], рис. 9.

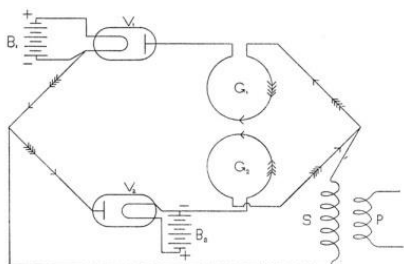


Рис. 13. Принципиальная схема волномера с дифференциальным гальванометром [21]. 1905 г.

Fig. 13. Schematic diagram of a wavemeter with a differential galvanometer [21]. 1905

Для подключения волномера к источнику электрических колебаний используется вторичная обмотка P трансформатора (см. рис. 13). Основным преимуществом этого волномера является возможность исследования поведения любой конкретной формы электрических колебаний, производимых передатчиком.

В заключение Флеминг отмечает, что предложенное устройство может быть полезно не только в качестве простого средства обнаружения электрических колебаний, но также может быть использовано и в качестве метрического устройства для их измерения.

9. Заключение

Известная до изобретения Флеминга выпрямительная двухэлектродная вакуумная лампа Венельта предназначалась для низкочастотных переменных токов. Что касается патента Флеминга, то его вакуумный клапан относился исключительно к изобретению волномера для измерения длин электромагнитных волн, хотя в нем и была приведена схема использования этого устройства для беспроводной телеграфии. Область использования клапана Флеминга не была еще четко очерчена в 1904 году и в этот период времени его применение ограничивалось только измерениями высокочастотных колебаний. Под влиянием экспериментов Маркони в 1905 году Флеминг расширил возможности практического применения пустотного клапана, используя его в качестве детектирующего устройства для радиосвязи. Для этих целей он сконструировал несколько конструкций радиоприемников на вакуумных диодах. На некоторые схемные решения для этих радиоприемных устройств им были получены патенты.

Список литературы

1. Fleming J. A. A Note on a Form of Magnetic Detector for Herrzian Waves adapted for Quantitative Work//Proceedings of the Royal Society. 1903. T. 74. C. 398—401.
2. Fleming J. A. The principles of electric wave telegraphy. Longmans, Green, and Co. 39 Paternoster Row, London, New York and Bombay. 1906. C. 382—386.
3. Buscemi. V. Trasparenza dei Liquidi per le onde Hertziane // Nuovo Cimento. 1905. T. 9. C. 105—112.
4. Fleming J. A. On a Hot-Wire Ammeter for the Measurement of Very Small Alternating Currents (read at the Physical Society on 25 March 1904) // Proceedings of the Physical Society of London. 1904. T. 19. C. 173—184.
5. Fleming J. A. Henzian Wave Telegraphy (Cantor Lecture given on 16 March 1903) // Journal of the Society of Arts. 1902—03. T. 51. C. 762.
6. Fleming J. A. Improvements in Apparatus Employed for Measuring Wave Lengths in Wireless Telegraphy. Patent GB190413736. Date of Application, 17th June, 1904.
7. Rosling P. The Rectification of Alternating Currents // Electrician. 1906. 58. C. 677—679.

8. Nodon A. Electrolytic Rectifier: An Experimental Research (read at the St. Louis International Congress), Electrician. 14 October 1904. 53. C. 1037—1039.
9. Nodon A. Stromrichter für ein- oder mehrphasigen Wechselstrom. DE139837C. Patentiert im Deutschen Reich vom 11. März 1902 ab.
10. Nodon A. Improvements relating to Rectifiers for Single or Polyphase Alternating Currents. GB190205978A. Date of Application, 11th Mar., 1902 Complete Specification Left, 3rd Dec., 1902 — Accepted, 11th Mar., 1903.
11. Nodon A. Rectifiers for Single or Polyphase Alternating Currents. US715126. Application filed Apr. 30, 1902. Patented Dec. 2, 1902.
12. Pupin M. I. Method of Producing Asymmetrical Currents from Symmetrical Alternating Electromotive Forces. US713044. Application filed January 4, 1898. Renewed Oct. 4, 1902. Patented Nov. 4, 1902.
13. Fleming A. On the Conversion of Electric Oscillation into Continuous Currents by means of Vacuum Valve // Proceedings of the Royal Society. 1905. T. 74. C. 476—487.
14. Fleming J. A. The Electronic Theory of Electricity // Proceedings of the Royal Institution. 1902. T. 17. C. 163—181.
15. Sir John Ambrose Fleming. Memories of a scientific life. Marshall, Morgan & Scott. London. 1934. 244 c.
16. Wehnelt A. Ein elektrisches Ventilrohr // Annalen der Physik. 1906. Band 24, Helt 1, C. 138—156
17. Wehnelt A. Über den Austritt negativer Ionen aus glühenden Metallverbindungen und damit zusammenhängende Erscheinungen // Annalen der Physik. 1905. Band 14. Helt 8. C. 425—468.
18. Wehnelt Arthur. Elektrisches Ventil. Patentschrift. DE157845. Patentiert im Deutschen Reich vom 15. Januar 1904 ab.
19. Fleming J. A. The Construction and Use of Oscillation Valves for Rectifying High-Frequency Electric Currents // Proceedings of the Physical Society. 1906. T. 20. C. 177—185.
20. Electrician. 31 March 1905. T. 54. C. 961.
21. Fleming J. A. Improvements in Instruments for Detecting and Measuring Alternating Electric Currents. Patent GB190424850. Date of Application, 16th Nov., 1904.
22. Hong Sungook. Wireless from Marconi's Black-Box to the Audion. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England. 2001. C. 221—222.
23. Marconi to Fleming, 14 Feb. 1905, University College London MS Add 122/1, Fleming Collection. Fleming to Marconi, 15 Feb. 1905, MCA, Chelmsford. G. Marconi, Recent Advances in Wireless Telegraphy (Friday Lecture on 3 March 1905), Proceedings of the Royal Institution 18 (1905), C. 31—45.
24. Fleming to Marconi, 24 March 1905, MCA, Chelmsford.
25. Memorandum of Agreement between the Marconi Company and Fleming 26 May 1905, MCA, Chelmsford.
26. Fleming to Marconi, 9 Oct. 1906, MCA, Chelmsford.
27. Fleming J. A. On the Conversion of Electric Oscillations into Continuous Currents by means of a Vacuum Valve // Royal Society of London Proceedings, Feb. 9, 1905. T. 74. P. 476—487.

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.

Information about the authors

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

УДК 621.37-621.39(091)

Электрический конденсатор — инновационная технология XVIII века

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
Россия, 191119, Санкт-Петербург ул. Правды, 13
pvm205@yandex.ru*

Получено: 13 августа 2019 г.

Отрецензировано: 9 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: *Инновационные технологии прошлых веков, как не удивительно, играют немалую роль в современной науке и технике. Так, радиотехника не может обойтись без инновационной технологии 18 века — эффекта электрической емкости. Эффект был открыт соборным деканом Эвальдом Клейстом из городка Каммин в Померании. Несколько позже, в голландском Лейдене в лаборатории известного физика Питера Мушенбрука был проведен опыт, аналогичный опыту Клейста. Информация о Лейденском эксперименте благодаря французскому физiku Жану Антуану Нолле получила широкую огласку в научных кругах Европы и затмила результаты Клейста. Это стало причиной последующих споров относительно признания приоритета данного открытия. В статье представлены и обсуждаются переплетения этой истории на основании исторических документов.*

Ключевые слова: *инновационные технологии 18 века, Эвальд Георг (Юрген) Клейст, бутылка Клейста, Питер Мушенбрук, лейденская банка.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Электрический конденсатор — инновационная технология XVIII века // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 2. С. 285—309.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Электрический конденсатор — инновационная технология XVIII века / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 2. С. 285—309.

Electric capacitor – innovative technology of the XVIII century

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13 Pravda St. Petersburg, 191119, Russia
pvm205@yandex.ru

Received: August 13, 2019

Peer-reviewed: September 9, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *Innovative technologies of the past centuries, not surprisingly, play a significant role in modern science and technology. Thus, radio engineering cannot do without the innovative technology of the 18th century – the effect of electrical capacitance. The effect was discovered by Cathedral Dean Ewald Kleist of Cammin in Pomerania. A little later, in the Dutch Leiden in the laboratory of the famous physicist Pieter Musschenbroek was conducted an experiment similar to the experience of Kleist. Information about the Leiden experiment thanks to the French physicist Jean Antoine Nollet received wide publicity in scientific circles in Europe and eclipsed the results of Kleist. This led to subsequent disputes over the recognition of the priority of the discovery. The article presents and discusses the interweaving of this history based on historical documents.*

Keywords: *innovation technology of the 18th century, Ewald Georg (Jürgen) Kleist, Kleist bottle, Pieter Musschenbroek, Leiden jar.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, “Electric capacitor – innovative technology of the XVIII century,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 285–309, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.25

1. Введение

Восемнадцатый век был эпохой удивительных электрических явлений. Увлечение электрическими опытами¹ в середине века охватило различные социальные слои общества и стало своеобразной модой. Основываясь на многовековых наблюдениях экспериментов, в которых объекты можно заряжать, просто потирая друг о друга, были созданы все виды электрических «машин». Всеобщему увлечению такого рода опытами

¹ Эксперимент (от лат. *experimentum* — проба, опыт) — является процедурой, выполняемой для поддержки, опровержения или подтверждения гипотезы, или теории. Любой эксперимент предполагает проведение тех или иных опытов. Опыт — воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях проведения эксперимента при возможности регистрации его результатов.

поддались не только врачи, юристы, монахи и другие, но даже ученые в университетах. Экспериментаторы пытались наэлектризовать различные тела, как твердые, так и жидкие. Они верили, что после таких воздействий предметы станут обладать чудодействующей силой.

Публично на площадях и сценах театров демонстрировались эффектные и увлекательные опыты! В то время электричество было фактически синонимом зрелищ, с его новым акцентом на чудо и любопытство. Преисполненные достоинства ученые могли извлекать из наэлектризованных (заряженных) людей длинные искры, поднесением руки зажечь спирт или кучку пороха. Эти впечатляющие представления производились простыми средствами: стеклянной палочкой, натертой сухим мехом, вращающимися стеклянными шарами и цилиндрами, трущимися о ладони человека, изолированного от пола. Не случайно 1750—1780-е годы вошли в историю физики как «период электричества от трения».

Все это позволило развить науку об электростатическом заряде и совершить прорыв в области электричества и магнетизма. Первой такой инновацией стало открытие эффекта электрического сосуда, способного накапливать и хранить некоторое время статический электрический заряд, то есть в современном понятии — эффект электрического конденсатора.

Открытие эффекта связано с двумя именами: немецким соборным деканом Эвальдом Георгом фон Клейстом (нем. *Ewald Georg von Kleist*; 10.06.1700—11.12.1748) и голландским физиком профессором трех университетов: Дуйсбургского, Утрехтского и Лейденского Питером ван Мусшенброком (нидерл. *Pieter (Petrus) van Musschenbroek*, 14.03.1692—19.09.1761). Их взгляд на природу электричества основывался на том, что они рассматривали эту субстанцию как своего рода жидкость и надеялись создать особый сосуд для ее аккумуляции.

Это открытие позволило создать стабильный источник электричества. Инновационная технология сразу нашла применение в медицине. Она позволила создать новую отрасль науки, связанную с электростатической терапией, которая, правда, не оправдала возложенных на нее надежд.

2. Кафедральный собор Каммин

Чтобы понять, как непрофессиональный ученый Георг фон Клейст смог сделать свое открытие, необходимо знать духовную среду, в которой он находился. Собор Святого Иоанна Крестителя (польск. *Katedra św. Jana Chrzciciela*) в городе Каммине (нем. *Cammin*), как правило, называют Кафедральным собором (нем. *Kathedrale*, польск. *Katedra*, англ. *Cathedral*) Каммин, рис. 1. Обычно собор является общим названием главной церкви

города, которая служит резиденцией епископства. Этот термин от незнания его сущности также используют в обиходе для названия организационной единицы университета и даже для стола лектора.

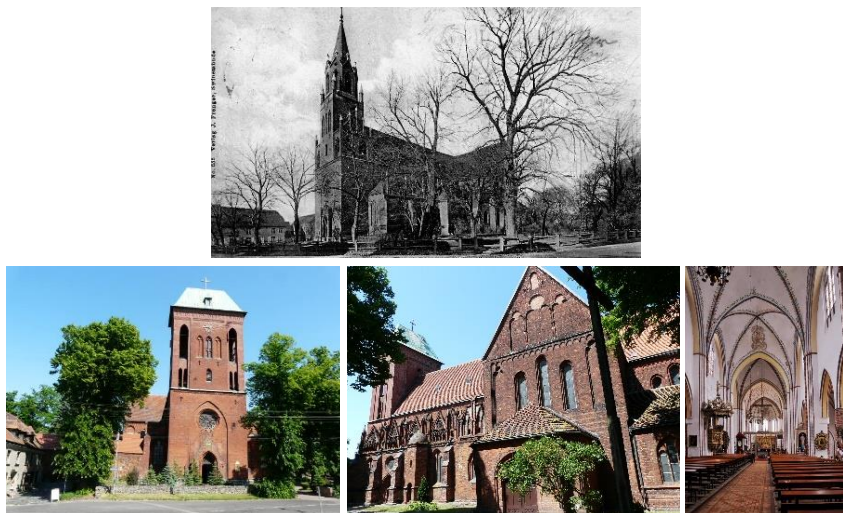


Рис. 1. Общий вид кафедрального собора Святого Иоанна Крестителя: сверху Каммин (1905—1910), внизу — три фото сегодняшнего дня Камień-Поморски (2019) [1].

Fig. 1. General view of the Cathedral of St. John the Baptist: on the top in Cammin (1905–1910) and on the bottom are three photos of the present day Kamień Pomorski (2019) [1]

Кирпичное здание собора Каммин считается самым большим церковным сооружением Померании. С 1176 г. Каммин служил церковной столицей Померании и резиденцией местного епископа. В 1534 году дворянство Померании перешло в лютеранство. Несмотря на использование протестантского церковного постановления, ранг собора церкви был сохранен, и до 19 века в церкви был глава собора. Собор оставался лютеранской церковью до 1945 года. В середине 18 века в Каммине проживало около 1000 жителей.

У каждой епархии обычно есть декан собора, отвечающий за кафедральный собор и контроль деканов области, в данном географическом районе. Рядом с собором Каммин было построено здание для низшего духовенства, которое называлось деканат (нем. *Kleisthaus*), в котором также проживал фон Клейст.

Декан избирался окружным синодом по предложению областного епископа. В обязанности декана входило:

— публичное представление церковного округа,

- контроль пастырей и других служащих в церковном округе,
- консультирование работников этого района по рабочему процессу,
- организация посещения приходов совместно с районным церковным советом.

После 1945 года решением Потсдамской конференции земли Померании, в том числе город Каммин, были переданы Польше. Жившее там немецкое население подверглось геноциду и было полностью изгнано. В их дома с находящимся там имуществом въехали переселенные поляки. Собор перешел в руки римско-католической церкви в качестве приходского храма. С 1972 года он был одним из кафедральных соборов Каменно-Щецинской епархии. Город Каммин был переименован в Камень-Поморски (польск. *Kamień Pomorski*). Сегодня город имеет статус городской-сельской гмины, с населением 9144 человек (2013).

3. Проблема хранения электрического заряда

Экспериментаторам во время электрических опытов требовались различной величины электрические заряды, которые нужно было не только производить, но хранить. Было очень трудно сохранять электрическое состояние. Для проведения успешных опытов требовалось большое искусство экспериментирования. Даже при соблюдении определенных предосторожностей не всегда удавалось довести опыт до конца. Попытки решить эту проблему долгое время не давали требуемого результата, до тех пор, пока этим вопросом в 1738 году не занялся, став профессором естественной философии Виттенбергского университета в Саксонии Георг Бозе (Georg Matthias Bose, 1710—1761). В рамках своего курса физики он возобновил эксперименты с электростатической машиной со стеклянным шаром по проекту английского физика Фрэнсиса Хауксби старшего (Francis Hauksbee the Elder, 1660—1713). Бозе позже значительно улучшил машину, добавив «главный проводник» (названный кондуктором), который позволял накапливать и хранить некоторое время генерируемый статический электрический заряд большой величины, рис. 2.

Бозе первым разработал способ временного хранения статических электрических зарядов с использованием изолированного проводника (кондуктора) [3]. Он заметил, что электрическое действие может быть усилено, если отводить электричество от шара генератора жестяной трубкой.

Первоначально кондуктор Бозе состоял из человека, стоящего на блоке смолы (эффективный изолятор), который держал металлическую трубку в одной руке, касаясь вращающегося шара электростатического

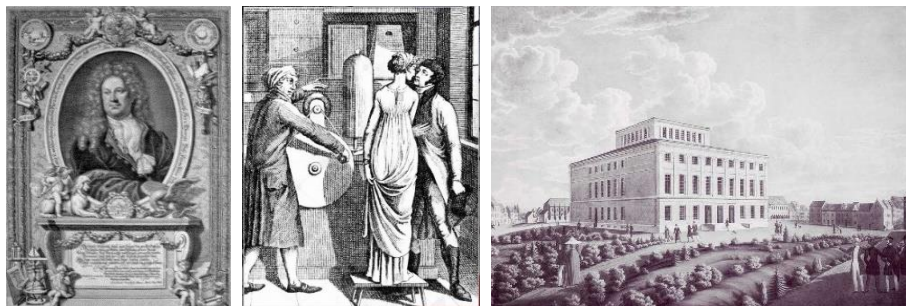


Рис. 2. Георг Бозе, электростатический генератор Бозе в опыте «Электрический поцелуй» и общий вид Галле-Виттенбергского университета в 1836 году [2].

Fig. 2. Georg Bosc, the Bosc electrostatic generator in the “Electric Kiss” experiment and a general view of the Halle-Wittenberg University in 1836 [2]

генератора другой. Генерируемый трением заряд протекал через помощника к металлической трубке и накапливался на ее поверхности. По сути, это напоминало демонстрацию эксперимента под названием «Летающий мальчик» (рис. 3) английским физиком Стивеном Греем (Stephen Gray, 12.1666—07.02.1736) в 1730 году, но только с использованием металлического проводника. Позже трубку стали подвешивать на шелковых шнурах и приводили ее в соприкосновение с шаром посредством пучка проводящих нитей, воткнутых одним концом в трубку, а другим — скользящих по шару. До открытия эффекта конденсатора кондуктор был единственным действенным устройством для хранения электрического заряда. Кондуктор обычно представлял собой один или несколько полых латунных цилиндров, укрепленных на стеклянных подставках.

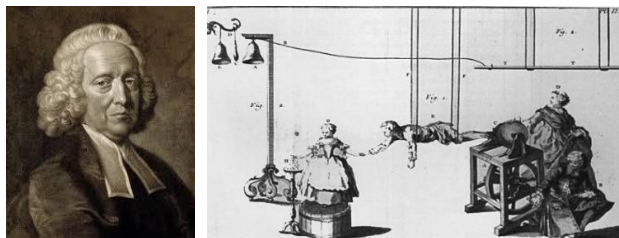


Рис. 3. Стивен Грей и его демонстрация статического электричества в эксперименте «Летающий мальчик» (1730 г.).

Fig. 3. Stephen Gray and his demonstration of static electricity in the “Flying Boy” experiment (1730)

Новизной в экспериментах Бозе было использование металлической трубки, хотя в то время считалось, что только изоляторы (тогда называе-

мые «электриками») могут эффективно накапливать статическое электричество. Известно, что металлические проводники рассеивают любой заряд относительно быстро, и необходимость изолировать заряженные объекты от электрического контакта с землей не была должным образом оценена. Более поздние эксперименты других экспериментаторов показали, что не масса главного проводника определяет предел накопления электростатики до определенной величины, а его внешние размеры, поскольку одноименные заряды отталкиваются и поэтому накопительный эффект существует только на внешней поверхности кондуктора.

В течение трех лет, с 1742 по 1745 год, Бозе продвигал исследования электричества в Германии и прославился своими впечатляющими экспериментами, в том числе теми, в которых он поджигал алкогольные напитки, плавающие на поверхности воды проходящей через нее искрой, генерируемой фрикционной машиной. Поскольку вода и огонь рассматривались как прямые противоположности, то это стало сенсацией среди наблюдателей и широко упоминалось в научной переписке.

В 1744 году Бозе опубликовал статью о разжигании «огня» из наэлектризованной воды, содержащейся в маленькой стеклянной бутылке. В этом же году Бозе опубликовал свои основные работы по электричеству в форме брошюр, выпущенных в Лондоне и Париже.

Демонстрации и эксперименты Бозе вызвали интерес немецкого научного сообщества и общественности к развитию электрических исследований.

4. Банка Клейста

Авторство первооткрывателя эффекта электрического конденсатора давно оспаривается. Похоже, что в хронологическом порядке эта честь принадлежит Эвальду фон Клейсту, декану собора города Каммин в области Померания Королевства Пруссия.

Живя в провинции, где не было особых развлечений, он все свое свободное время, остававшееся от выполнения обязанностей декана, посвящал экспериментам с электричеством, в то время очень модной научной областью. Для Клейста научные исследования были своеобразным хобби, обычным занятием для образованных людей того времени.

Эксперименты Клейста в период, *предшествовавший открытию эффекта накопления электроэнергии*, были известны научному сообществу. Профессор физики Лейпцигского университета Иоганн Генрих Винклер (Johann Heinrich Winckler, 12.03.1703—18.05.1770) был первым, кто сообщил об этом в своей трехтомной монографии *«Die Eigenschaften der*

electrischen Materie und des electrischen Feuers aus verschiedenen neuen Versuchen erklärt, und, nebst etlichen neuen Maschinen zum Electrisieren, beschrieben. Winkler 1744—1746» (Свойства электрического вещества и электрического огня с объяснением и описанием, исходя из различных новых экспериментов, наряду с несколькими новыми машинами для электризации), рис. 4. Во втором томе под названием «Мысли о свойствах, эффектах и причинах электричества» (нем. *Gedanken von den Eigenschaften, Wirkungen und Ursachen der Electricität*. 1745. 164 s.) приводится описание «прибора Клейста» как устройства для хранения и доставки очень мощного электрического удара [4]. Винклер усовершенствовал банку Клейста, намотав цепь вокруг бутылки, которой прикасался к металлической пластине (кондуктору) своего генератора с несколькими шарами. Электрический удар, производимый этим оборудованием, вызывал у него судороги, возбуждение крови и жар.



Рис. 4. Общий вид 1, 2 и 3 томов и титульные листы трех томов монографии Иоганна Вилклера «Die Eigenschaften der electrischen Materie und des electrischen Feuers aus verschiedenen neuen Versuchen erklärt, und, nebst etlichen neuen Maschinen zum Electrisieren, beschrieben» (1744, 1745, 1746).

Fig. 4. General view of volumes 1, 2, and 3 and title pages of three volumes of Johann Wickler's monograph "Die Eigenschaften der electrischen Materie und des electrischen Feuers aus verschiedenen neuen Versuchen erklärt, und, nebst etlichen neuen Maschinen zum Electrisieren" (1744, 1745, 1746)

Известие об алкогольном эксперименте Бозе быстро дошло до Померании. В это время декан Каминского собора экспериментировал с генератором трения. Эвальд фон Клейст подвешивал над своей машиной большую печную трубу на шелковых нитях, исходя из обстоятельств, а не из конструкции. Труба по форме и массе наиболее подходила для главного проводника и эффективно позволяла аккумулировать электрический заряд.

Клейст был заинтригован разрядами щетки, видимыми в темной комнате вокруг основного проводника электростатического генератора, и пытался «поймать» разряд гвоздем, выступающим из стеклянного пузырька из-под лекарств с небольшим количеством воды. На идею хранения электрической энергии фон Клейст натолкнул случай. Однажды он поставил на оловянную тарелку наэлектризованный стакан с водой, прикоснулся к нему и неожиданно получил сильный удар электрического разряда. В дальнейших опытах вместо оловянной тарелки он использовал алюминиевую фольгу. К 1745 году Клейст научился накапливать заряд, достаточный для того, чтобы во время ходьбы использовать его свечение, исходящее с конца гвоздя, в роли переносной лампы [5].

Фон Клейст решил провести эксперимент Бозе по передаче электричества через воду к воспламеняющейся жидкости, находящейся в стеклянной бутылке. Он знал, что стекло бутылки будет действовать как изолятор и предотвратит выход электричества.

11 октября 1745 года фон Клейст изготовил прибор в виде стеклянной бутылки с длинным узким горлышком, которая была частично заполнена водой и плотно закрыта пробкой, рис. 5. Оригинальную бутылку Клейст изготовил сам из синего стекла в виде цилиндра высотой около 1 фута (30 см) и диаметром 6 дюймов. В бутылке был закреплен массивный железный гвоздь, проткнутый сквозь пробку и опущенный в жидкость. Для получения некоторого заряда для проведения опыта фон Клейст брал рукой бутылку и прикасался гвоздем к кондуктору своей электрической стеклянной машине, сделанной из измельченного стеклянного шарика. При этом ничего особенного не происходило, но, внеся бутылку в темную комнату, он заметил небольшое пламя, которое указывало ему на то, что произошел заряд алкоголя огнем Святого Эльма² (англ. *Saint Elmo's fire*, *Saint Elmo's light*). Когда Клейст коснулся ногтя своей свободной рукой, он получил сильный удар и испугался. Позднее он установил, что этот удар бывает значительно сильнее, если бутылка наполнена спиртом или ртутью.

² Возникновение таких огней связано с наличием ионизированных частиц в воздухе. Их количество многократно увеличивается обычно во время грозы. При этом они создают свое электрическое поле в атмосфере. Во время столкновения ионных зарядов с обычными молекулами в атмосфере происходит разряд и появляется свечение, которое заметно человеческому глазу.



Рис. 5. Эвальд Георг фон Клейст и общий вид «бутылки Клейста» (1745 г.)

Fig. 5. Ewald Georg von Kleist and the general view of the “Kleist bottle” (1745)

Фон Клейст изобрел электрическую емкость, но он не понял значения своей руки в форме чаши, охватившей для удержания бутылку вокруг ее дна, которая обеспечивала один внешний проводящий элемент. Это, как оказалось, было необходимо для того, чтобы электрическая бутылка аккумулировала большое количество заряда. Испытав такой шок, он, естественно, не жаждал снова взять бутылку в руку, и похоже, что из-за этого он не смог повторить эксперимент.

Клейст по ощущениям прекрасно знал, какой силы электрический заряд дает его электростатический генератор, и не побоялся взяться за гвоздь в банке, и выдержать сильную встряску током. Из этого следовало, что банка накапливает, конденсирует электричество. С помощью изобретенного устройства Клейсту удавалось получать очень большие искры. Благочестивый клерик должным образом исследовал другие свойства своей бутылки, так как позже он писал коллегам, что шок (болевого удар) от усовершенствованных версий его устройства способен «сбить с ног ребенка восьми-девяти лет»!

5. Сообщение фон Клейста о своем открытии

Впервые фон Клейст сообщил о своем открытии в письмах от 4 ноября и 28 ноября 1745 года [6]. Он подробно описал свой опыт и отправил отчет 4 ноября 1745 года в Берлин доктору медицины Иоганну Либеркюну (нем. *Johann Nathanael Lieberkühn*, 05.09.1711—07.10.1756), который был членом Берлинской академии наук (*Berliner Akademie*) и секретарем ее секции физики. Либеркюн без задержки сообщил об этих опытах в Берлинскую академию. В конце следующего года Клейст стал ее членом по предложению выдающегося немецкого ученого Г. Лейбница (нем. *Gottfried Wilhelm von Leibniz*).

28 ноября было передано письмо Павлу Свитлицкому (*Swietlicki*), лютеранскому дьякону церкви св. Иоанна в Данциге (*Danzig*, ныне Гданьск,

Польша), который, будучи соучредителем Общества экспериментальной физики, доложил на его заседании о полученной информации. Письмо Павлу Свитлицкому сохранилось до наших дней, рис. 6 [7].

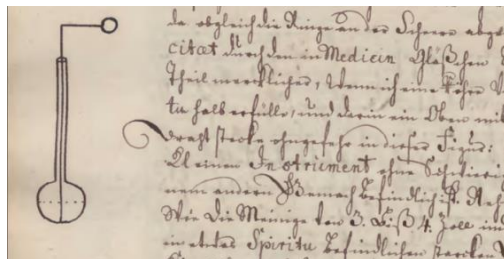


Рис. 6. Фрагмент письма фон Клейста с рисунком его конструкции электрической бутылки, которое было передано дьякону Павлу Свитлицкому. 28.11.1745 г. [8].

Fig. 6. A fragment of a von Kleist letter with a picture of his design of an electric bottle, which was transferred to Deacon Pavel Swietlitski. November 28, 1745 [8]

Клейст сообщил о своих результатах, по крайней мере, пяти различным экспериментаторам в области электричества [9].

В декабре 1745 года Клейст лично сообщил о своем опыте протодиакону³ в Данциге, который передал об этом информацию бургомистру этого города Даниэлю Гралату⁴ (Daniel Gralath, 30.05.1708—23.07.1767).

Ученые из Берлина и Галле ответили на письма Клейста через несколько месяцев, и сообщили, что они не смогли повторить описанный эксперимент. Это, возможно, одна из причин того, что Клейст остался малоизвестным ученым.

По всей видимости, только Гралату, одному из немногих, опыты удались. Вначале у него ничего не получалось, но вступив в контакт с Клейстом и получив соответствующие советы, он сумел преодолеть трудности. Уже 5 марта 1746 года Гралат провел успешные опыты со своим помощником Готфридом Рейгером (Gottfried Reyger). Исследование проводилось в Данциге, в зале здания «Зеленые ворота» (нем. *Grünes Tor*), где располагалось Общество, рис. 7. С этой целью он наполнил водою стеклянную бутылку наполовину, поместил в нее железный стержень с шариком на верхнем конце и поднес этот шарик в соприкосновение с заряженным кондуктором электрической машины. Гралат после «заряда» бутылки

³ Протодиакон — первый или главный диакон в епархии при кафедральном соборе.

⁴ Гралат вместе со своим тестем Я. Т. Клейном (Jacob Theodor Klein, 15.08.1685—27.02.1759) были инициаторами создания в Данциге 2 января 1743 года Общества экспериментальной физики (Societas Physicae Experimentalis), с 1753 года оно стало называться Обществом естествоиспытателей (naturforschende Gesellschaft, латинское *Societas Physicae Experimentalis*).

решил продемонстрировать силу этого заряда следующим образом. Он образовал «цепь» из 20 человек, державшихся за руки. Первый человек держал в одной руке заряженную бутылку, а у последнего в цепи одна рука была свободна. Когда этот последний касался рукою шарика на железном стержне, то все 20 человек получали электрический удар. Удара не происходило, если последний человек касался самой бутылки, равно как и в том случае, когда шарика на железном стержне касался кто-нибудь, не стоявший в цепи. Гралат сделал из своих опытов важный вывод о том, что «заряженная» бутылка дает электрические удары только в том случае, если между железным стержнем и внешней поверхностью бутылки устанавливается соединение.



Рис. 7. Бургомистр Данцига Даниэль Гралат и здание Grünes Tor в Данциге, в котором он повторил опыты Клейста 5 марта 1746 г.

Fig. 7. Danzig burgomaster Daniel Gralath and the Green Gate building in Danzig, in which he repeated Kleist's experiments on March 5, 1746

Фон Клейст описал свои опыты также в письме, направленном 19 декабря 1745 года профессору медицины Иоганну Готтлобу Крюгеру (Johann Gottlob Krüger, 15.06.1715—06.10.1759) в Галле (Германия). Крюгер в этот период времени работал в Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (Немецкая академия естествоиспытателей «Леопольдина», потом стала Национальной академией наук Германии), в которой занимались вопросами медицины и связанными с ней аспектами естественной философии, такими как ботаника и физиология.

В 1746 году Крюгер издал свое сочинение «Истории Земли с древнейших времен» (нем. *Geschichte der Erde in den allerältesten Zeiten*), в котором поместил информацию об опытах Клейста без его разрешения, обосновав их важность (на странице 176) следующим образом: «Среди писем, которые мне написали иностранные ученые в области электричества, есть два, которые заслуживают того, чтобы о них узнали, потому что они содержат новые исследования. Хотя у меня нет разрешения напечатать господина соборного декана фон Клейста, представленного выдаю-

щимися авторами, поэтому я не могу поверить, что они будут так же противостоят одному и тому же, поскольку они так умны в естествознании», рис. 8.



Рис. 8. Общий вид на здание Немецкой академии естествоиспытателей «Леопольдина» в Галле, Иоганн Готтлоб Крюгер и обложка его книги “Geschichte der Erde in den allerältesten Zeiten”, в которой помещена информация об исследованиях Клейста (1746).

Fig. 8. General view of the building of the German Academy of Naturalists “Leopoldin” in Halle, Johann Gottlob Krueger and the cover of his book “Earth History from Ancient Times”, which contains information on the studies of Kleist (1746)

В сочинении Иоганна Крюгера приведено описание восьми опытов Клейста, ниже приведем два из них [10]:

Опыт 3. Если вы положите толстую проволоку, гвоздь и т. д. в узкую стеклянную медицинскую бутылку и произведете ее заряд электричеством, тогда ощутите особенно сильные шокковые удары; бутылка должна быть сухой и теплой. Добавление ртути или спирта внутрь бутылки усиливает эффект. После отсоединения бутылки от электростатической машины на ней появляется светящийся язычок (электрический свет), такой, что я смог пройти 60 шагов, и в комнате было светло.

Опыт 7. Вы электризуете оловянную трубку — для меня это обычная 12-футовая трубка (вероятно, телескоп с фокусным расстоянием 12 футов), — и, не прекращая ее электризовать, касаетесь головки гвоздя в стеклянном сосуде. Трудно определить, какой величины электризации можно достичь, лучшим доказательством этого является сам опыт как таковой.

В этой первоначальной конструкции усилительной банки, как еще в то время называли в опытах электрическую емкость, внутренней обкладкой была жидкость, а внешней — рука или металлическая тарелка, на которую ставили стеклянную бутылку. Клейстом была предложена принципиальная схема конденсатора, содержащая два электрода (жидкость и рука), разделенных стеклянной стенкой бутылки. Стекло, в современном понятии, представляло собой диэлектрик.

6. Лейденская банка

Открытие в Каммине произвело сенсацию и живо обсуждалось в научных кругах Европы зимой 1745—1746 гг. Корреспонденты Клейста были вначале неспособны повторить его демонстрации, потому что они (и, вероятно, сам Клейст) изначально не осознавали важность удерживания рукой внешней поверхности бутылки как внешнего проводящего заземляющего электрода. Этот необычный электрод, как оказалось позже, был необходим для аккумуляирования большого количества заряда бутылкой Клейста.

Клейст о своем открытии известил письмами коллег физиков в разных университетах, в том числе и в Лейденском университете, выпускником которого являлся. Он переписывался со своими бывшими знакомыми студентами по учебе в университете, адвокатом Андреас Куней (Andreas Cunaeus, 1712—1788) и теологом Жаном Фредериком Фрэнсисом Луи Алламандом⁵ (Jean Frederique Francis Louis Allamand, 1736—1803).

Из немногих ученых, получивших письма Клейста о его открытии, опыты успешно повторили не только в Данциге, но и в голландском Лейдене. В 1746 году, подобный эксперимент был проведен независимо Куней в лаборатории своего знакомого, заведующего кафедрой философии Лейденского университета⁶ Питера ван Мушенбрука⁷. Во время опыта Куней провод от фрикционной машины опустил в стеклянную колбу с водой, которую держал в руке и случайно прикоснулся к отводящей проволоке. Условия опыта были те же, что и у опыта Клейста, поэтому произошло то, что и должно было случиться: Куней получил сильный электрический удар.

Куней сообщил о проведенном опыте Жану Алламанду, который передал информацию Мюссенбруку. Алламанд и Мушенбрук повторили опыты в лаборатории, рис. 9. Результат был тот же, экспериментаторы получили такой же мощный электрический удар.

Куней и Алламанду, которые работали совместно с Питером Мушенбруком над новыми электрическими экспериментами, потребовалось время, чтобы раскрыть секрет опытов Клейста. В конце концов они выяснили важность внешней проводящей поверхности, обеспечиваемой рукой.

⁵ Жан Алламанд приехал из Швейцарии, жил и работал в Нидерландах. Он занимался физикой и сотрудничал с Мушенбруком. В 1747 году он стал профессором физики в университете Франкена, а с 1749 года в университете Лейдена. В 1759—1760 гг. стал ректором этого университета. Автор нескольких книг по философии и физике.

⁶ Лейденский университет был основан в 1575 году Вильгельмом Оранжским как дар городу за его сопротивление испанским войскам. Статус города Лейден получил в 1266 г. Его население в середине 18 века составляло 40000 человек.

⁷ Мушенбрук был членом Лондонского Королевского общества (1734), членом Французской академии наук (1734), а также почетным профессором Императорской Академии наук в Санкт-Петербурге (1754).



Рис. 9. Общий вид корпусов Лейденского университета (1746), Питер ван Мушенбрук и его опыт с электрической стеклянной банкой (1746)

Fig. 9. General buildings of Leiden University (1746), Pieter van Musschenbroek and his experience with an electric glass jar (1746)

Будучи иностранным членом Академии наук в Париже, Ван Мушенбрук отправлял научные доклады члену этой академии наук Рене Антуану Фершо де Реомюру⁸ (фр. *René Antoine Ferchault de Réaumur*; 28.02.1683—17.10.1757). В Академии Реомюр был назначен корреспондентом Мушенбрука. Реомюр собирал и публиковал отчеты об измерениях температур воздуха с помощью предложенного им термометра в различных местностях и странах. Позднее он потерял интерес к термометрии.

Доклад, адресованный Реомюру в начале января 1746 г., касался в основном метеорологических наблюдений, проведенных в Лейдене [11]. В конце, однако, ван Мушенбрук добавил чрезвычайно интересный отрывок только потому, что, по его словам, «я увидел, что в конце этого текста есть свободное место». Его сообщение было прочитано аббатом Жаном Антуаном Нолле (фр. *Jean Antoine Nollet*, 1700—1770) и зафиксировано в протоколах на открытом заседании Академии в апреле 1746 г. [12]. Наука обязана этому первому сообщению о сделанном открытии в г. Лейден Мушенбруком, после того как он ощутил удар разряда банки, о чем не преминул написать на «свободном месте» в письме: «...Я занимался изучением электрической силы. Для этого повесил на двух шелковых голубых нитях железный стержень, который получал электричество от стеклянного шара, который быстро вращался вокруг своей оси и натирался руками. На другом конце был подвешен медный провод, конец которого опущен стеклянную цилиндрическую посудину, наполненную наполовину водой. Эту посудину я держал в правой руке, а левой рукой я пытался получить из электрического стержня искру. Вдруг правая рука получила удар такой силы, что все тело вздрогнуло, как будто ударила молния», рис. 10. Далее

⁸ В 1730 г. Реомюр описал изобретенный им спиртовой термометр, шкала которого определялась точками кипения и замерзания воды.

автор эмоционально пишет, что даже за корону Франции он не согласился бы еще раз получить такой удар. В письме Мушенбрука отмечается, что результаты проведенной большой исследовательской работы еще предстоит переосмыслить: «Я так много узнал об электричестве, что дошел до того, что ничего не понимаю и ничего не могу объяснить».

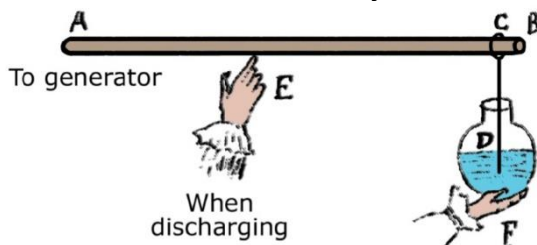


Рис. 10. Рисунок из письма Мушенбрука аббату Жану Нолле от 20 января 1746 г. [12].

Fig. 10. Drawing from the letter of Musschenbroek to Abbot Jean Nollet of January 20, 1746 [12]

Через несколько дней после прочтения этого письма Нолле получил от Жана Алламанд сообщения о том же эксперименте. Но, в последующем письме к Нолле Алламанд отметил, что первым обнаружил эффект, описанный в письме Мушенбрука, состоятельный любитель научных опытов Куней из Лейдена.

Алламанд сообщил об электрической банке также в письме в Королевское общество от 4 февраля 1746 года. Нолле оценил важность сообщения, перевел это письмо и опубликовал его в 1746 году в «Записках французской академии наук» [13].

В начале 1746 г. Мушенбрук после повторения опытов Клейста заявил, что еще в 1745 г. он случайно наткнулся на подобный эффект. При проведении своих электрических опытов он испытывал неудобства от того, что электричество исчезало очень быстро. Мушенбрук пытался устранить это явление тем, что накапливал электрический заряд в теле, окруженном «дурным проводником». Он налил в бутылку воду и пытался отвести электричество в нее по свисающей с кондуктора проволоке, однако, результат был неудовлетворительный.

Что касается даты объявленного открытия Мушенбруком, то в «Философских трудах» (Philosophical Transactions of the Royal Society of London) было опубликовано письмо мистера Абраама Трамбле⁹, сообщившего об одной из первых демонстраций лейденской банки 4 февраля 1745 г., почти за год до даты открытия Мушенбрука [14].

⁹Абраам Трамбле (фр. *Abraham Trembley*, 03.09.1710—12.05.1784) — швейцарский натуралист, член Лондонского королевского общества с 1743 г.

В этом письме, в частности, говорилось и о том, что сотрудник лаборатории Алламанд попытался повторить опыт Андреаса Куней, но с той лишь разницей, что вместо бутылки с водой он использовал полностью наполненный водой стакан. Эффект от заряда электричеством был тот же. Экспериментатор вырвал из устройства пальцем искру и получил сильнейший удар по всему телу. В эксперименте использовались емкости из различных типов стекла (английское стекло для линз очков и богемское стекло), но лучше всего эффект накопления электрических зарядов наблюдался при использовании пивного стакана. Мушенбрук повторил этот эксперимент, но с тем лишь отличием, что держал в руке тонкую стеклянную чашу полную воды, и тоже испытал ужасную боль от электрического удара. Он отметил, что в эксперименте стекло не должно быть мокрым снаружи.

Однако по-прежнему существует некоторое противоречие по этому поводу, но общепринятое мнение таково: «Трембле, как редактор или составитель письма в «Философских трудах» [15], либо неверно написал письмо, либо не смог должным образом перевести дату его написания в новый стиль (NS). До 1752 года англичане начинали свой узаконенный год 25 марта, так что, упрощено говоря, их даты на год отставали от континентальных для первой четверти каждого континентального года. Это похоже на правду, так как у Мушенбрука и его сотрудников не было никаких причин откладывать объявление на 11 месяцев, особенно с учетом потенциальной претензии на предварительное открытие фон Клейста.

Письмо Трамбле обращает на себя внимание тем, что это одно из самых ранних письменных сообщений из первых рук об этом новом открытии. Он случайно оказался в Голландии примерно в то время, когда произошло открытие, и его письмо было первым словом в Англии о чудесной новой банке-сосуде.

7. Окончательное название электрического сосуда

Опыт Мушенбрука получил широкую огласку благодаря аббату Жану Нолле. Он, будучи в переписке, так сказать, со всем ученым миром, получил известие об этой бутылке из Лейдена, а так как он переводил письмо Мушенбрука с латыни, то дал название изобретению «лейденская банка», в честь города, в котором она появилась [16]. Это несмотря на многочисленные просьбы назвать его бутылкой Клейста [17]. Нолле проигнорировал и письмо Гралата о приоритете Клейста. Электрическая бутылка почти повсюду стала известна под именем «лейденской» банки, тогда как Клейста редко называли ее изобретателем, рис. 11.

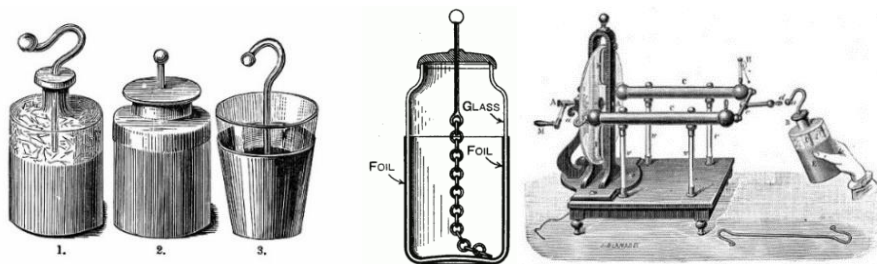


Рис. 11. Конструкции лейденских банок и их заряд от электростатического генератора. 18 век.

Fig. 11. Designs of Leiden jar and their charging from an electrostatic generator. 18 centuries

Можно предположить, что продвижение лейденской банки Нолле носило не случайный характер. Нолле и Мушенбрук были хорошими знакомыми, что сыграло не маловажную роль в предпочтении авторства открытия. Дело в том, что Мушенбрук был видным ученым не только в области экспериментальной физики, но также философии, механике и математике. Он, ко всему прочему, придерживался взглядов Ньютона и являлся его последователем. К нему ехали со всей Европы студенты, желающие изучить физические эксперименты. В 1736 году одним из них был Нолле из Франции, который в последствии стал известным ученым, воспитателем королевской семьи и ведущим представителем научной школы Мушенбрука во Франции.

В этот период времени они были связаны еще совместным бизнесом. Питер Мушенбрук, его отец и брат владели производством научных инструментов. Мушенбрук считается изобретателем нескольких физических измерительных приборов: трибометра (для измерения силы трения), атмометра (для измерения скорости испарения воды) и пирометра (для измерения высоких температур). Нолле во Франции представлял коммерческие интересы Мушенбрука и занимался реализацией продукции.

Нолле (рис. 12), был членом французской Академии и благодаря своей обширной переписке пользовался настолько огромным влиянием, которое нам теперь даже трудно представить, после того как место научной переписки везде заняла периодическая печать и Интернет. И то, что электрическая банка повсюду называется лейденской банкой, а не бутылкой Клейста, нужно приписать исключительно влиянию Нолле. Более объективный термин «бутылка Клейста» почти был вытеснен, а Мушенбрук, сообщивший Нолле новость открытия, удостоился чести первооткрывателя эффекта накопления электростатических зарядов электрической банкой.



Рис. 12. Французский священник (аббат) и физик Жан-Антуан Нолле и его книга лекций по экспериментальной физике (1770 г.).

Fig. 12. French priest (abbot) and physicist Jean-Antoine Nollet and his lecture book on experimental physics (1770)

Сообщения Мушенбрука взбудоражили Европу, каждый философ хотел исследовать «ужасную банку», хотя в целом признавал, что лучше наблюдать ее воздействие на ком-то другом! Упомянутый профессор Иоганн Винклер с увлечением взялся за повторением опытов, после которых у него были сильные конвульсии в теле, и кровь до того разгорячилась, что он опасался сильной горячки и принимал прохладительные лекарства. После одного из таких опытов у него в руках появились такие колющие боли, что он не мог писать в течение восьми дней. Винклер проводил эксперименты по разряду с лейденскими банками, а их физиологические эффекты испытал не только на себе, но также и на своей жене. Он сообщил, что его жена не могла ходить до конца дня, когда он использовал ее для короткого замыкания заряженной банки [4]. Нужно отметить, что Винклер с 1747 года был членом Лондонского королевского общества и его физические и философские лекции посещал Иоганн Вольфганг Гете.

Эти страшные явления заставили Винклера задуматься над вопросом разряда лейденской банки без участия человеческого тела. Для этого он придумал следующую конструкцию разрядника. Один конец железной цепочки наматывался на балку машины с кондуктором, а другой ее конец соприкасался с оловянной тарелкой, на которой был укреплен металлический кружок. Для электрического разряда кружок приближали к кондуктору, который находился в контакте с гвоздем банки. С помощью этого довольно сложного разрядника экспериментатор получал электрические удары, которые не причиняли боли. Винклер, для получения искр большой длины, которые можно было видеть и слышать на расстоянии двухсот шагов, использовал банки большого объема, вместо гвоздя стал употреблять железную проволоку с шариком на конце, а спирт заменил водой.

Заметим, что устройство и эксперимент Мушенбрука были очень похожи на то, что было у Клейста, однако с некоторыми исключениями. Во-первых, открытие сделал Андреас Куней, а не сам Мушенбрук. Во-вторых, Мушенбрук написал своим коллегам письма с объяснением всего, что касается устройства самой лейденской банки и методике проведения с ней опытов [18]. В-третьих, Мушенбрук внес много усовершенствований в конструкцию электрической емкости, среди них следует отметить, удаление воды из банки и использование металлической фольги для обертывания внутренней и внешней сторон банки. Мушенбруком была предложена конструкция электростатической машины для заряда электрической емкости (рис. 13), а также разрядник для нее с диэлектрическими держателями. Конструкция электростатической машины была приведена в переизданном популярном учебнике Мушенбрука «Сборник физических экспериментов для университета», который вышел после его смерти в 1762 году [19].

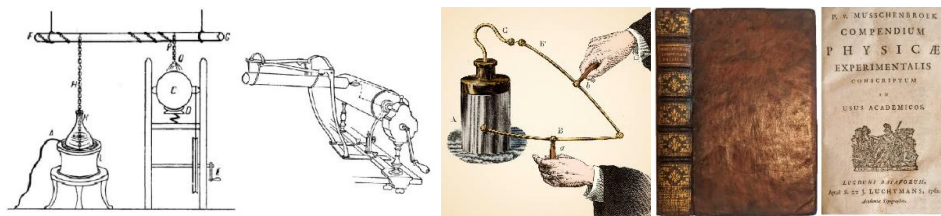


Рис. 13. Электростатическая машина Мушенбрука для зарядки электрической емкости, разрядник с диэлектрическими держателями (в центре) и учебник Мушенбрука «Сборник физических экспериментов для университета» (1762 г.).

Fig. 13. Musschenbroek's electrostatic machine for charging electric capacitance, spark gap with dielectric holders (in the center) and textbook Musschenbroek "Compendium Physicae Experimentalis Conscriptum in Usus Academicos" (1762)

Сделанные Мушенбруком усовершенствования электрической емкости и разработанные им методики обращения с ней, а также публикация результатов опытов сыграли немаловажную роль в прибавлении ему известности как автору инновационной технологии.

8. Кто же первооткрыватель эффекта электрического сосуда?

Мушенбруку обычно приписывают открытие лейденской банки, именно открытие, а не изобретение. Ему были известны работы Бозе и фон Клейста, которые предшествовали его опытам. Тем не менее, по прошествии столетий, считается, что исследования Клейста и Мушенбрука были проведены полностью независимо друг от друга и якобы имело место простое научное совпадение полученных результатов. Нужно отметить, что

сам же Мушенбрук никогда не утверждал, что открыл лейденскую банку, к тому же, он ни разу не упомянул имени Клейста в своих работах [20].

В различных исторических документах А. Куней упоминается как со-автор и друг Мушенбрука, в то время как другие ошибочно приравнивают Мушенбрука к Куней, ставя его имя в скобках [21]. В Германии, однако, это устройство называется «бутылка Клейста» (Kleistsche Flasche). Фон Клейст умер менее чем через три года после своего открытия и вероятно, он не уделил должного внимания тому, насколько оно значимо, рис. 14.



Рис. 14. Дом Клейста, бывшая деканская курия (1930). Памятный камень, установленный к 300-летию со дня рождения фон Клейста, в Камень-Поморском (2000 г.) [22].

Fig. 14. Kleist's House, former Deccan Curia (1930). A memorial stone erected for the 300th anniversary of the birth of von Kleist in Kamień Pomorski (2000) [22]

Фон Клейст был первым, кто обнаружил удивительные эффекты электрической стеклянной бутылки, но именно Мушенбрук и его помощники (Куней и Алламанд) достаточно четко сообщили о своих результатах, чтобы другие смогли повторить эксперимент, и поэтому заслуга в первенстве предмета открытия досталась ему. Нолле и Французская академия наук сформировали мнение научного мира об открытии эффекта накопления электричества, связав его с Мушенбруком. В большинстве европейских странах часто превалирует французская точка зрения в вопросе этого открытия.

При этом не последнюю роль играет соперничество стран в предпочтении своим соотечественникам в первенстве открытия эффекта электрической емкости. [23, 24].

9. Лейденская банка в искусстве

В Соединенных Штатах лейденскую банку с юмором называли «шок-бутылкой» (shock-bottle). Лейденскую банку высоко ценили за ее большую универсальность в экспериментах с электричеством. Бенджамин Франклин однажды ее назвал чудо-банкой Мушенбрука.

В Польше, менее чем через полвека после открытия, электрическая банка становится важным элементом театральной постановки, вокруг которого разворачивается сюжет оперы «Как будто чуд», известной как «Краковцы и Горцы» на музыку Яна Стефани (пол. *Jana Stefaniego*) к либретто Войцеха Богуславского (пол. *Krakowiacy i Górale Wojciecha Bogusławskiego*). Премьера состоялась 1 марта 1794 года в Национальном театре в Варшаве, после двух разделов Польши, в тот момент, когда над ней снова собирались черные тучи. На сцене в одной из сюжетных линий оперы предстает образованный студент и электрическая машина. Тем самым автор хочет показать, что наука не только эффективно борется с невежеством и суеверием, но также способствует национальному примирению. Широкая публика получила легкую комедию о новом изобретении, которое используется для благородной цели — предотвращению братоубийственной войны. В финале автор оперы просто призывает жить в гармонии и мире: берегите мир, нет прибыли в таком бою, который причиняет вред брату.

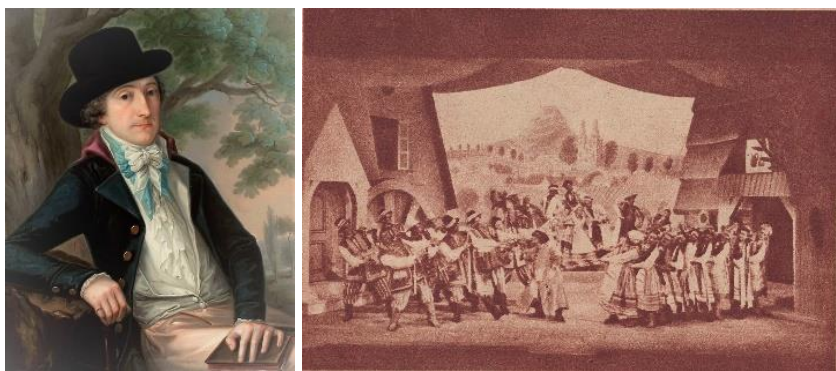


Рис. 15. Войцех Богуславский (1798 г.) и сцена из оперы «Как будто чудо» или «Краковцы и Горцы». Театр Войска Польского в Лодзи под руководством Леона Шиллера (1946).

Fig. 15. Wojciech Boguslavsky (1798) and a scene from the opera “As if a miracle” or “Krakow and Highlanders”. Polish Army Theater in Lodz under the direction of Leon Schiller (1946)

Лейденская банка привлекла внимание даже писателей, и была увековечена в научной фантастике Жюль Верном в его романе «Двадцать тысяч лье под морями» (1869 г., в старых русских переводах — «Восемьдесят тысяч верст под водой», в советских — «80 000 километров под водой»). В романе участники экспедиции во время подводной охоты использовали лейденские банки в качестве пуль, так называемые лейденские шары.

10. Заключение

Две великие инновации, электростатические генераторы и электрическая емкость, ознаменовали прогресс в изучении электричества в начале пятого десятилетия 18-го века. Они позволили производить электрические эффекты в большем масштабе, чем когда-либо прежде, что открыло возможности в создании совершенно новых типов экспериментов и зрелищных публичных демонстраций, которые привлекали внимание к науке об электричестве. Электростатические генераторы и электрическая емкость, хотя внесли свой вклад в теорию электричества, но были неадекватными.

Значение, приписывавшееся в то время электрической емкости (лейденской банке), которая рассматривалась как великая победа науки, было, конечно, сильно преувеличено. Однако это преувеличение оказалось благотворным, так как именно оно способствовало рождению целой армии физиков, убежденных в том, что исследование электрических явлений — достойное занятие для ученого.

Лейденская банка явилась предшественницей современных электрических батарей. Открытие эффекта лейденской банки (англ. *Leyden jar*) имело фундаментальное значение при изучении электричества. Банка работала, в принципе, как конденсатор для хранения электрической энергии и использовалась для проведения многих ранних экспериментов в электричестве.

До изобретения электрического сосуда исследователям приходилось для накопления заряда прибегать к изолированным проводникам больших размеров. Лейденская банка явилась гораздо более компактной альтернативой и положила начало так называемому раннему веку электричества.

Возможно, есть некоторая ирония в том, что, хотя сегодня больше нет необходимости хранить статическое электричество, первые научные исследования электричества стали возможными именно благодаря надежному устройству для его хранения.

Список литературы

1. Katedra URL: <https://polska-org.pl/7306537,foto.html?idEntity=7243183> (06.10.2019)
2. Georg Bose. URL: https://www.wikiwand.com/de/Georg_Bose (06.10.2019)
3. Georg Matthias Bose. The World's #1 Online Encyclopedia. URL: https://wikimili.com/en/Georg_Matthias_Bose (06.10.2019)
4. Winkler, Johann Heinrich. Die Eigenschaften der Electricischen Materie und des Electricischen Feuers, aus verschiedenen neuen Versuchen erkläret, und, nebst etlichen neuen Maschinen. Leipzig, 1745. 164 с.
5. Лакур П., Аппель Я. Историческая физика. Т. II. Одесса. Mathesis. 1908. С. 232—234.

6. D. Gralath, "Geschichte der electricität – Zweite anschnitt," Versuche Abhandlungen Naturforschenden Gesellschaft Danzig. 1754. T. 2. C. 355—460.
7. Schreiben das herr von Kleist, decanus des domcapituls in camin [dean of the cathedral chapter in kammin] an herr swietlicki von 20 Nov, 1745 // Acta Societatis Physicae Experimentalis (Danzig). 1745, T. 3.
8. Flaszki Kleista i butelki lejdejskie: elektryczny szok uczonej Europy (1745—1746). URL: <https://kierul.wordpress.com/tag/du-chatelet/>
9. Heilbron J. L. Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study of Early Modern Physics. University of California Press. 1979. C. 311.
10. Krüger, Johann Gottlob: Geschichte der Erde in den allerältesten Zeiten. Halle, 1746. C. 175—181.
11. "Letter from Pieter van Musschenbroek to René Antoine Ferchault de Réaumur, dated January 20, 1746," in Procès Verbaux. Academie Royale des Sciences (Paris). 1746. T. 65. C. 4—6.
12. Here is Nollet's own account of the event. Observations sur quelques nouveaux phénomènes d'Électricité. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences De l'Année 1746. Paris, 1751. C. 1—3. The account from the Academy of Sciences only refers to the "Leyden experiment" (l'expérience de Leyde): Sur l'Électricité Histoire de l'Académie Royale des Sciences De l'Année 1746. Paris, 1751. C. 1—17.
13. Nollet J. A. Mémoires de l'Académie impériale des sciences. 1746. 2.
14. XI. Part of a Letter from Mr. Trembley, F. R. S. to Martin Folkes, Esq; Pref. R. S. concerning the Eight caused by Quicksilver sbaken in a Glass Tube, proceeding from Electricity. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. January and December, 1746. T. 44. Iss. 478. C. 58—60.
15. The First Condenser – A Beer Glass. Pieter Van Musschenbroek (1692–1761). URL: http://www.sparkmuseum.com/BOOK_LEYDEN.HTM (23.09.2019)
16. Here is Nollet's own account of the event. Observations sur quelques nouveaux phénomènes d'Électricité, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences De l'Année 1746. Paris, 1751. C. 1—3. The account from the Academy of Sciences only refers to the "Leyden experiment" (l'expérience de Leyde): Sur l'Électricité. Histoire de l'Académie Royale des Sciences De l'Année 1746. Paris, 1751, C. 1—17.
17. Wiedemann G. Die Lehre von der Elektrizitdt. 1893. T I. Vieweg und Sohn. Braunschweig. C. 137.
18. Capacitors – Invention History and the Story of Leyden Jar. Website "CircuitsToday". URL: <http://www.circuitstoday.com/capacitors-invention-history-and-the-story-of-leyden-jar> (23.09.2019).
19. Musschenbroek, Petrus van. Compendium Physicae Experimentalis Conscriptum in Usus Academicos. Lugduni Batavorum: Apud S. et J. Luchtmans, 1762. 515 c.
20. Heilbron J. L. Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study of Early Modern Physics. University of California Press, 1979. C. 314.
21. Sawicki Jerzy. Kleist vs. Musschenbroek – trudna droga do prawdy // Studia Historiae Scientiarum (SHS). 2018. №.17. C. 275—340.
22. Klasik Marian. Von Kleist czy Musschenbroeck? Website ikamien.pl, Poniedziałek, Kamień Pomorski. URL: <http://ikamien.pl/artykuly/2186/> (24.09.2019).
23. Feldhaus F. M. Die Erfindung der Elektrischen Verstärkungsflasche durch Ewald Jürgen von Kleist. Heidelberg, Germany: Carl Winter's Universitätsbuchhandlung, 1903.
24. Dorsman C., Crommelin C. A. He invention of the Leyden Jar // Janus. 1957. T. 46. C. 275—280.

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.

Information about the authors

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.