

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2022

Том 5

№ 2

Журнал основан в 2018 г.
Выходит 4 раза в год

Почетный главный редактор

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

Главный редактор

Вольвач Александр Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (Крым, Россия)

Редакционная коллегия

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

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

Ермолов Павел Петрович — кандидат технических наук, заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия) — заместитель главного редактора

Иванов Вячеслав Элизбарович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Калошин Вадим Анатольевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Электродинамика композиционных сред и структур» Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, профессор кафедры «Радиотехника и системы управления» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт — национальный исследовательский университет» (Москва, Россия)

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

Носков Владислав Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

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

Пестриков Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных систем и технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения» (Санкт-Петербург, Россия)

Пестряков Александр Валентинович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиооборудование и схемотехника», руководитель научно-исследовательского отдела «Радиотехнические системы и устройства» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (Москва, Россия)

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

Старостенко Владимир Викторович — доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой радиофизики и электроники Физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» (Симферополь, Россия)

Широков Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронная техника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

Афонин Игорь Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

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

Iicev Dimov Stojce — professor at Durban University of Technology (South Africa)

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

Нечаев Владимир Дмитриевич — доктор политических наук, профессор РАО, ректор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Новиков Владимир Витальевич — доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова» (Севастополь, Россия)

Содержание

Физические науки (1.3)

Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Сверхмощное вспыхивающее явление лазера водяного пара в протозвездной системе IRAS 16293-2422	153
N. F. Karushkin and I. A. Obukhov, Nanophoton Generator of Picosecond Pulses	169

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Пестряков А. В. Разработка и испытание комбинированной системы глобального мониторинга подвижных объектов	185
Александров В. Р., Баранов С. Е., Кузнецов М. И., Мальгин С. А., Обухов И. А., Свердлова А. Д., Фатеев Д. А. Искусственный интеллект в задачах планирования производства	196
Александров В. Р., Баранов С. Е., Обухов И. А. Промышленный интернет вещей для предприятий радиоэлектронной промышленности	209
Новиков С. С., Костерова В. С. Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы	218
Громоздин В. В., Иевлев К. В., Козуб М. С., Новикова Т. В. Метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции ...	236
Широков И. Б., Евдокимов П. А., Соколова М. И. Моделирование коаксиально-волноводного перехода в программном пакете ANSYS HFSS	247
Дегтярёв А. Н., Кожемякин А. С. Метод синтеза согласованного фильтра для условий белого шума и негауссовских помех	253

История науки и техники (5.6.6)

Пестриков В. М. Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий	260
---	-----

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2022

Vol. 5

No. 2

The journal was founded in 2018
Published 4 times a year

Honorary Chief Editor

Gulyaev Yury Vasilievich – Scientific Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, academician, member of the Presidium of the RAS (Moscow, Russia)

Editor in Chief

Volvach Alexander Evgenievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Research of the Federal State Budgetary Institution of Science “Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences” (Crimea, Russia)

Editorial Board

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

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

Yermolov Pavel Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Basic Department “Innovative Radio Electronics” of the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia) – Deputy Editor-in-Chief

Ivanov Vyacheslav Elizbarovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin” (Ekaterinburg, Russia)

Kaloshin Vadim Anatolyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory “Electrodynamics of Composite Media and Structures” of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, Professor of the Department of Radio Engineering and Control Systems of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Moscow Institute of Physics and Technology – National Research University” (Moscow, Russia)

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

Noskov Vladislav Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin” (Ekaterinburg, Russia)

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

Pestrikov Victor Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Audiovisual Systems and Technologies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State Institute of Film and Television” (St. Petersburg, Russia)

Pestryakov Alexander Valentinovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Equipment and Circuitry, Head of the Research Department of Radio Engineering Systems and Devices of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow Technical University of Communications and Informatics” (Moscow, Russia)

Sovlukov Alexander Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Control Problems named after V. A. Trapeznikov RAS (Moscow, Russia)

Starostenko Vladimir Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Radiophysics and Electronics of the Physico-Technical Institute of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky” (Simferopol, Russia)

Shirokov Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic Engineering of the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

Afonin Igor Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Radioelectronic Systems and Technologies” of the Institute of Radioelectronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

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

Ilcev Dimov Stojce – Professor at Durban University of Technology (South Africa)

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

Nechaev Vladimir Dmitrievich – Doctor of Political Sciences, Professor of the Russian Academy of Education, Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

Novikov Vladimir Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Missile Weapons of Surface Ships of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education “Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P. S. Nakhimov” (Sevastopol, Russia)

Address:

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

Contents

Physical sciences

L. N. Volvach, A. E. Volvach, and M. G. Larionov , Super-Powerful Flare Phenomenon of the Water Maser in the Protostellar System IRAS 16293-2422.....	153
N. F. Karushkin and I. A. Obukhov , Nanophoton Generator of Picosecond Pulses	169

Electronics, photonics, instrumentation and communications

A. V. Pestryakov , Development and Testing of Combined Global Monitoring Systems for Moving Objects.....	185
V. R. Alexandrov, S. E. Baranov, M. I. Kuznetsov, S. A. Malgin, I. A. Obukhov, A. D. Sverdlova, and D. A. Fateev , Artificial Intelligence in the Tasks of Manufacturing Planning	196
V. R. Alexandrov, S. E. Baranov, and I. A. Obukhov , Industrial Internet of Things for Electronic Industry Enterprises	209
S. S. Novikov and V. S. Kosterova , Stable and Unstable Dynamic Processes in a Self-Oscillating System with Three Degrees of Freedom	218
V. V. Gromozdin, K. V. Ievlev, M. S. Kozub, and T. V. Novikova , Method for Determining the Range of a Coastal Radar Station	236
I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and M. I. Sokolova , Modeling a Coaxial-Waveguide Transition in the ANSYS HFSS Software Package	247
A. N. Degtyaryov and A. S. Kozhemyakin , Matched Filter Design Method for White Noise and Non-Gaussian Noise Conditions	253

History of science and technology

V. M. Pestrikov , Michael Pupin and Pupinization of Telephone Lines	260
--	-----

УДК 524.3

Сверхмощное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездной системе IRAS 16293-2422

¹ Вольвач Л. Н., ¹ Вольвач А. Е., ² Ларионов М. Г.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация

² Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Москва, Российская Федерация

volvach@bk.ru

Получено: 24 марта 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: На основе длительного мониторинга мазера водяного пара на частоте 22.2 ГГц с начала 2019 по март 2021 гг. было зарегистрировано самое мощное за всю историю наблюдений вспышечное явление в протозвездной системе IRAS 16293-2422 на скорости около -1.5 км/с, длившееся около двух лет. Мазерное излучение исходило из крупнейшей структуры мазерных пятен, высокая плотность которых создавала их частичное перекрытие друг друга по времени. Общее число отдельных мощных вспышек мазера воды составило десять. Благодаря высокой детализации полученных данных, фиксировавшихся с интервалом 1—2 дня, были получены новые уникальные результаты. Впервые было подтверждено существование столь сложной конфигурации излучающих мазерных пятен с очень близкими лучевыми скоростями, находящихся на луче зрения наблюдателя. Удалось установить, что мазеры мощных вспышек находились в ненасыщенном состоянии благодаря каскадной накачке нескольких мазеров на луче зрения наблюдателя. Получены новые важные параметры мазеров воды и высказано предположение об их локализации в газаво-пылевой структуре IRAS 16293-2422.

Ключевые слова: звездные образования, звезды с экзопланетами, молекулы, радиолинии, водные мазеры.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г. Сверхмощное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездной системе IRAS 16293-2422 // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 153—168.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Вольвач, Л. Н. Сверхмощное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездной системе IRAS 16293-2422 / Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 153—168.

1. Введение

IRAS 16293-2422 (далее IRAS 16293) представляет собой молодой звездный объект класса 0, который находится в облачном комплексе ρ Ophiuchus на расстоянии ~ 140 пк и имеет общую светимость $20\text{--}30 L_{\odot}$ [1, 2, 3]. Этот объект является протозвездной системой солнечных масс [4, 5]. Во внутренней структуре протозвезд присутствуют протопланетные диски [6—8]. В направлении на IRAS 16293 обнаружены источники континуума [9]. Зарегистрирована высокая активность источника, в котором есть биполярные истечения от протозвездной системы [10]. Для определения природы протозвездной системы необходимо изучать мазеры H_2O , которые отражают физические процессы в этих областях.

Мазеры воды, расположенные в фиксированных областях протозвездного облака, имеют свои отличительные особенности. Установлено существование кластеров мазерных скоплений (пятен). Пока не удалось установить их конкретную связь либо с истечениями из протозвезд, либо с газово-пылевыми дисками вокруг этих протозвезд [9, 11]. В принципе, с помощью мазеров воды можно определить динамические, пространственные и спектральные характеристики областей, в которых формируются физические условия для генерации мазерного излучения.

В данной работе приводятся новые уникальные данные о беспрецедентном по мощности и продолжительности вспышечном явлении мазера воды в протозвездной системе IRAS 16293, полученные в результате детального мониторинга этой протозвездной системы на радиотелескопе РТ-22 в Симеизе. Приводятся новые данные о характеристиках возбуждения и состояния мазера воды во время этого мощного сложного вспышечного явления в этом источнике.

2. Наблюдения и обработка

Наблюдательные данные рассматриваемого вспышечного явления, произошедшего на мазерном переходе $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ на частоте 22.235 ГГц, были получены в период с января 2019 по март 2021 гг. с использованием 22-метрового радиотелескопа РТ-22 (Симеиз). Ширина диаграммы направленности радиотелескопа (FWHM) на указанной частоте приема составляла 2.5 угловых минуты, эффективная площадь — 210 м^2 . Для приема инфор-

мации использовался приемник с шумовой температурой около 60 К. При различных погодных условиях температура приемной системы на углах места более 40° изменялась в пределах от 120 до 150 К. Данные наблюдений корректировались на атмосферное поглощение и изменение эффективной площади радиотелескопа на разных углах места. Источники *DR 21*, *Vir A* и *Cyg A* использовались для калибровки данных по потоку. Калибровка антенной температуры производилась с помощью температурного перепада, создаваемого фиксированной разностью температур на апертуре радиотелескопа от согласованной нагрузки, находящейся сначала при температуре жидкого азота, а затем при температуре окружающей среды. Приемник стабилизировался *H*-мазером частотой 5 МГц, данные наблюдений на 160 МГц передавались с радиотелескопа на спектрометр и регистрирующую аппаратуру. Использовался спектрополяриметрический радиометр с параллельным анализатором Фурье спектра с и полосой приема 16 МГц. Разрешение по частоте и по скорости составляло 8 и 2 кГц (0.105 и 0.03 км/с) соответственно [12]. Циклы наблюдений осуществлялись методом *on-off* и каждый состоял из накопления сигнала в течение 5—10 мин при наведении на источник (*on*) и вне источника (*off*). Процедуру можно было повторять для получения необходимого качества данных. Все операции проводились в автоматическом режиме, включая первичную обработку данных, что позволяло вносить корректировку в программу наблюдений.

3. Результаты

Данные длительного мониторинга спектральной плотности потока мазера воды в направлении протозвездного комплекса *IRAS 16293* на частоте 22,235 ГГц показаны на рис. 1. Вспышки занумерованы и обозначены символом «В».

Обнаруженное мощное вспышечное явление представляет собой суперпозицию отдельных более коротких вспышек. Оно началось с продолжительного медленного подъема плотности потока в начале марта 2019 г. и продолжалось до конца этого же года, то есть 9 месяцев. При этом его плотность потока достигла значения около 10000 Ян. После этого последовала серия из 9 более коротких мощных вспышек, длительность каждой из которых не превышала месяца. Затем вспышечное явление завершилось уменьшением плотности потока от 6000 Ян до минимального значения в сотни Ян за время около 4 месяцев. К концу марта 2021 г. вспышечное явление, как таковое, угасло. Важно отметить, что все обозначенные более короткие и мощные вспышки мазера воды располагались поверх длительного мощного подъема плотности потока. Вспышки 10, достигающего 10000 Ян. Длительная Вспышка 10 продолжалась около двух лет (рис. 1).

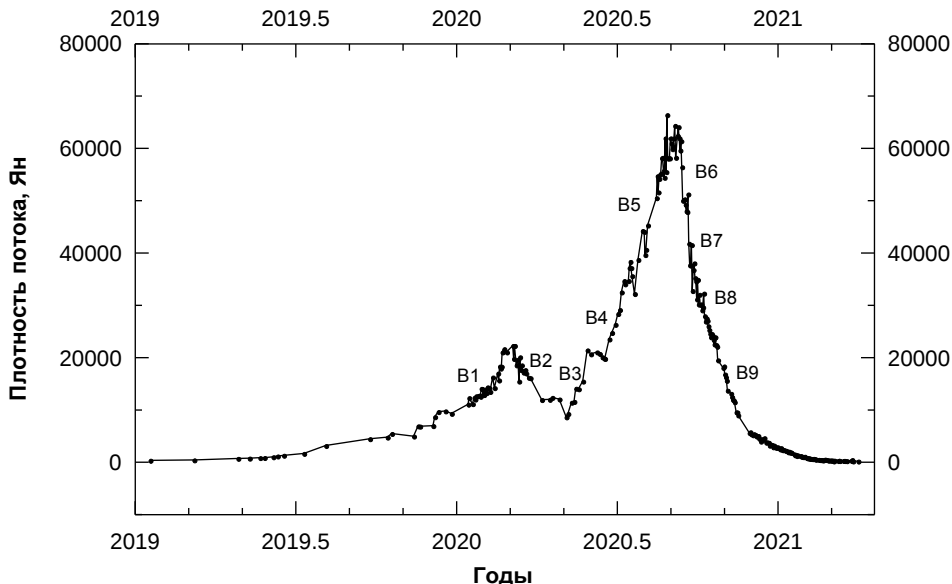


Рис. 1. Сверхмощное продолжительное вспыхивающее явление мазера воды в *IRAS 16293* вблизи скорости -1.5 км/с.

Fig. 1. Super-powerful continuous flare phenomenon of the water maser in *IRAS 16293* near the speed of -1.5 km/s

Чтобы понять физическую природу этого сложного вспыхивающего явления, были использованы спектрально-временной метод. В его основе находится одновременный анализ данных мониторинга плотности потока и спектральных данных. Мы условно разделили вспыхивающее явление на 9 более коротких вспышек и одну чрезвычайно длительную Вспышку 10 (рис. 1).

Изменение плотности потока 9 более коротких, но мощных вспышек, носило экспоненциальный характер как при росте, так и при спаде плотности потока. Такое поведение спектральной плотности потока является одним из важных признаков того, что мазер во время вспышки находился в ненасыщенном состоянии. При этом зависимость ширины линии $\Delta\nu$ от плотности потока мазерной линии S должна иметь вид [13]:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 / [1 + \ln(S/S_0)], \quad (1)$$

где $\Delta\nu_0$ — тепловая ширина линии молекулы воды, S_0 — входной поток в мазерную глобулу. Нами получена аппроксимация наблюдательных данных и соотношение, которое описывает экспериментальную зависимость [14]:

$$1/(\Delta\nu)^2 = a + b \cdot \ln S. \quad (2)$$

Здесь a и b — коэффициенты.

Для приведения формы выражения (1) к виду формулы (2) поменяем местами обе его части и возведем их в квадрат:

$$1/\Delta v^2 = [(1 - \ln S_0) + \ln S]/(\Delta v_0)^2, \quad (3)$$

откуда

$$(\Delta v_0)^2 = 1/b, \quad \ln S_0 = 1 - a(\Delta v_0)^2 \quad (4)$$

Из выражений (3, 4) получим выражение для коэффициентов:

$$a = (1 - \ln S_0)/\Delta v_0, \quad b = 1/(\Delta v_0)^2. \quad (5)$$

Первая из 9 мощных вспышек началась в феврале 2020 г. Ее амплитуда превысила 20000 Ян. На рис. 2 показана самая мощная вспышка 5 этого явления амплитудой около 65000 Ян. Спектральная линия вспышки имеет симметричную форму, ширина линии вблизи -1.5 км/с составляет $\Delta v_{5\text{измер}} \approx 0.94$ км/с. На спадающем по плотности потока склоне вспышечного явления изменения плотности потока также происходят по экспоненте, что должно давать близкое значение ширины линии к тому значению, которое получается на восходящем фронте вспышек. Действительно, для вспышки 7 ширина спектральной линии вблизи -1.5 км/с составляет $\Delta v_{4\text{измер}} \approx 0.96$ км/с (рис. 3). Ошибка измерения ширины спектральной линии близка к максимальному спектральному разрешению, равному 0.03 км/с.

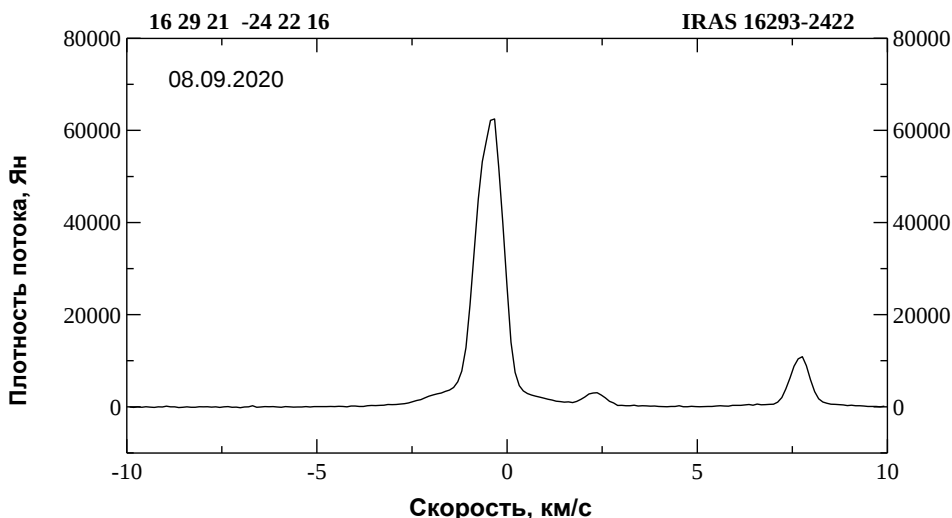


Рис. 2. Мощная Вспышка 5 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 2. Powerful Flare 5 at a radial velocity of about -1.5 km/s

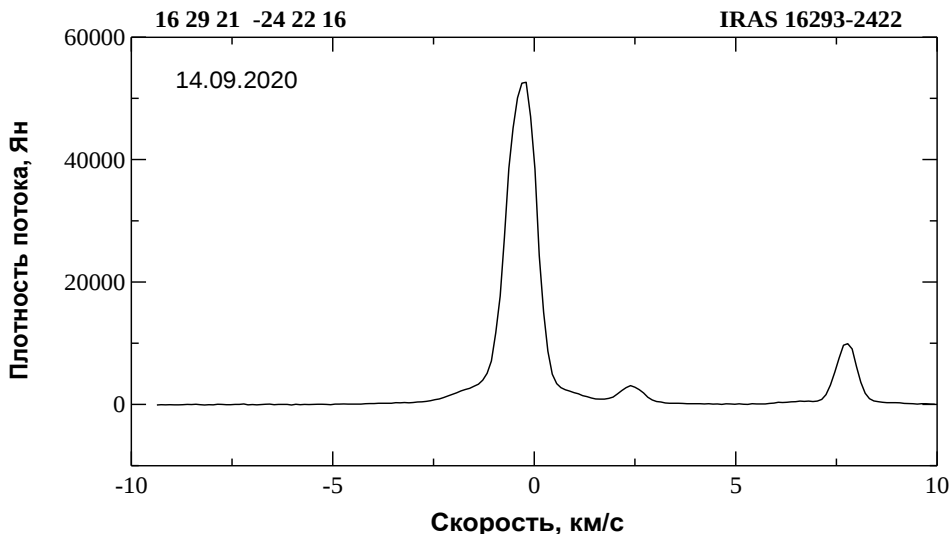


Рис. 3. Мощная Вспышка 7 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 3. Powerful Flare 7 at a radial velocity of about -1.5 km/s

Для Вспышек 5, 7 в соответствии с формулой (2) были построены зависимости, которые аппроксимированы прямыми линиями (рис. 4, 5). Из этих зависимостей могут быть найдены коэффициенты a и b в формулах (4), (5) и на их основе рассчитаны значения Δv_0 и S_0 . Для Вспышки 5, например, эти коэффициенты равны $a_5 = -1.96$, $b_5 = 0.81$. Полученные по этим коэффициентам $\Delta v_{05} \approx 1.05$ км/с и входной поток $S_{05} \approx 31$ кЯн.

Ранее мы указывали измеренное значение для Вспышки 5 — $\Delta v_{\text{измер}} \approx 0.94$ км/сек, что в пределах примерно 10 % совпадает модельным значением. Что касается входного потока, полученного из модельных представлений, $S_{05} \approx 31$ кЯн. Как раз такой входной поток создает Вспышка 4 для Вспышки 5 (рис. 1).

Вспышка 3 создает входной поток около 20 кЯн для вспышки 4. Это свидетельствует о том, что предложенная модель аппроксимации наблюдательных данных работает достаточно точно.

Полученные по вспышкам данные можно характеризовать следующим образом:

1. В 9 мощных вспышках наблюдается экспоненциальное изменение плотности потока во время подъема потока и его падения, как в случае ненасыщенного лазера воды.

2. Зависимость изменения обратной величины квадрата ширины линии от логарифма плотности потока линейная и находится в соответствии с ненасыщенным состоянием лазера во время вспышки.

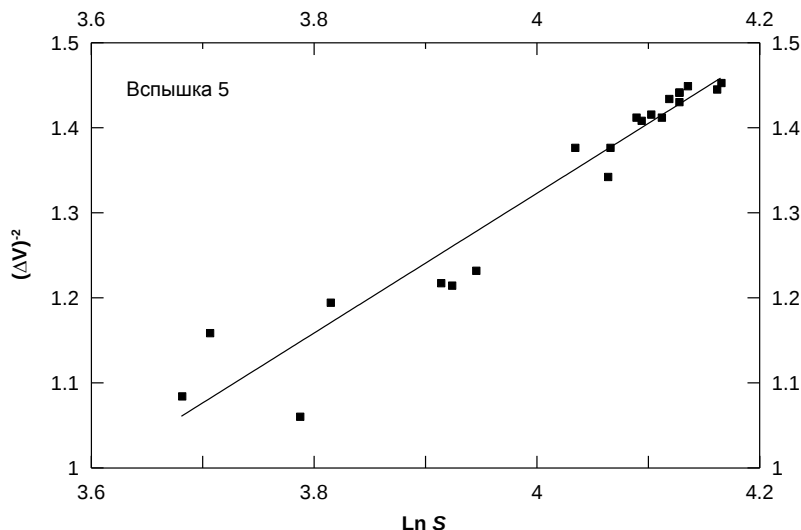


Рис. 4. Зависимость обратной величины квадрата ширины линии в минус второй степени от натурального логарифма плотности потока для Вспышки 5 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 4. Dependence of the reciprocal of the squared linewidth to the minus second power on the natural logarithm of the flux density for Flare 5 at a radial velocity of about -1.5 km/s

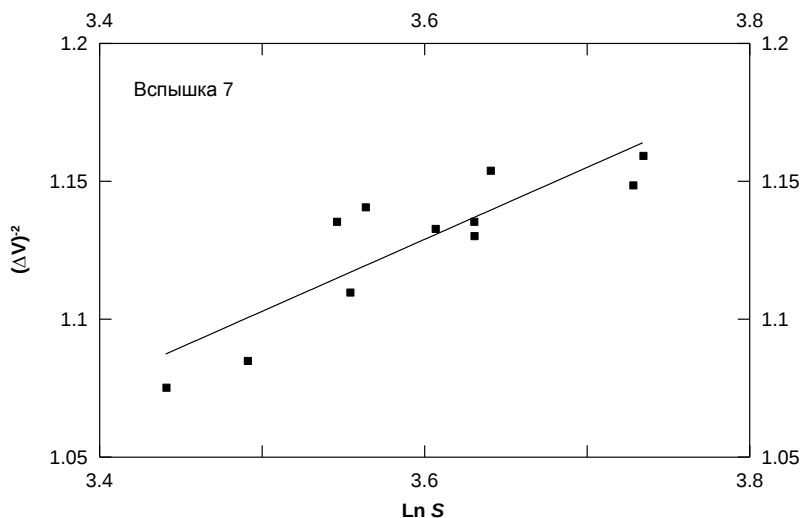


Рис. 5. Зависимость обратной величины квадрата ширины линии в минус второй степени от натурального логарифма плотности потока для Вспышки 7 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 5. Dependence of the reciprocal of the squared linewidth to the minus second power on the natural logarithm of the flux density for Flare 7 at a radial velocity of about -1.5 km/s

3. Следующие друг за другом вспышки мазера воды создают для последующих вспышек все более высокие значения плотности потока, обеспечивая рост общей плотности потока мощного продолжительного вспышечного явления.

4. Приведенные параметры вспышек согласуются с параметрами гигантских вспышек в *G25.65+1.05* и *W49N*, полученных нами ранее в работах [15, 16].

4. Дискуссия

Нами было зарегистрировано несколько случаев возникновения гигантских вспышек мазера воды в галактических областях мощного звездообразования как для низкоскоростных линий в *IRAS 16293* на скорости вблизи 8 км/с [17], так и для высокоскоростных, например, в *W49N* на скоростях близких к -81 км/с и -60 км/с [15]. Можно предположить, что многие мощные вспышечные явления имеют сложную структуру из-за чрезвычайно высокой плотности мазерных пятен в кластерах мазерного излучения. Высокая плотность мазерных конденсаций приводит к большой вероятности того, что на луче зрения наблюдателя во время вспышек окажется сразу несколько мазерных пятен. При возникновении агента, активирующего мазерное излучение, появляется возможность каскадного усиления мазера воды за счет увеличения уровня входного потока в каждую мазерную глобулу, находящуюся на луче зрения наблюдателя, и увеличения длины накачки мазера. В настоящее время еще нет достаточного числа таких явлений, когда наблюдательные данные, полученные за длительный период, имеют такую высокую детализацию по времени (один-два дня интервал съема данных). Поэтому мы пока не можем однозначно подтвердить предположение, что все мощные мазеры воды «устроены» одинаковым образом, и каждое новое явление подобного рода дает чрезвычайно важную информацию.

Полученная из наблюдательных данных физическая картина среды в излучаемых областях дает понимание процессов, происходящих в области генерации мазеров и может привести к сильным ограничениям на возможную модель генерации излучения. Вспышки мазера зависят от схемы накачки мазера (столкновительной или радиационной), типа поглотителя энергии мазерного теплового двигателя, типа перехода, составляющего цикл накачки (вращательный или колебательный).

Некоторые исследователи склоняются к мнению, что мощные вспышки водяного мазера объясняются столкновительно-столкновительным механизмом накачки на вращательных уровнях (*CCr*) из-за определенных трудностей, возникающих с другими механизмами, в частности, радиаци-

онным механизмом [18, 19]. Ранее механизм мазерной накачки CCr за фронтом ударной волны был предложен в работах [20, 21], где присутствуют сверхзвуковое истечение газа из молодой звезды и его взаимодействие с окружающим газовым облаком. Это приводит к сверхзвуковым ударным волнам, необходимым для накачки мазера воды. Механизм CCr -накачки под действием звездного ветра был предложен еще в работе [22]; позже он использовался другими авторами в гипотезах физичекой природы мазерных образований, находящихся в протопланетных дисках [23, 24].

Мы рассмотрим возможность применения модели CCr для объяснения коротких и очень мощных вспышек в $IRAS\ 16293$ на скорости вблизи -1.5 км/с. Основным условием CCr -накачки является наличие в мазерной среде не менее двух типов частиц (молекул или атомов водорода и электронов) с разными температурами, но вкладывающих в возбуждение уровней H_2O сравнимые отношения [25]. Вообще, CCr -накачка работает при всех плотностях, но для ее эффективной работы требуется достаточно высокая плотность среды. Вероятность столкновительных переходов для различных уровней (r или v) высоки только при определенных диапазонах степени ионизации. Интересно рассмотреть, как условия CCr -накачки могут быть выполнены в случае мощного вспышечного явления в $IRAS\ 16293$ на скорости около -1.5 км/с. Плотность среды, необходимая для эффективной работы CCv -накачки мазера при колебательных переходах в H_2O , на шесть порядков ниже, чем для вращательных переходов и нет смысла рассматривать их в дальнейшем. Мощность накачки, необходимая для наблюдаемой плотности потока от $IRAS\ 16293$ в линии воды, определяется из уравнения (3) и (8а) [25], откуда получено соотношение $n_1 \cdot \Delta P_{CCr} \geq n_1 \cdot \Delta P$:

$$n_1 \cdot n_e \cdot q_e^r \cdot [E_r / (kT_e)] \cdot [(T_H - T_e) / T_H] \geq 10 \cdot l^3 \cdot D^2 \cdot S \cdot (\Delta \nu_{H_2O} / \nu_{H_2O}), \quad (6)$$

или

$$n_1 n_e \geq \{10 \cdot l^3 \cdot D^2 \cdot S \cdot (\Delta \nu_{H_2O} / \nu_{H_2O})\} / \{q_e^r \cdot [E_r / (kT_e)] \cdot [(T_H - T_e) / T_H]\}. \quad (7)$$

Здесь n_1 — плотность населения нижнего сигнального уровня, n_e — электронная плотность, q_e^r — коэффициент дезактивации электронным ударом, $E_r = h \nu_{H_2O}$, T_e — кинетическая электронная температура, T_H — кинетическая температура H_2 молекул, l — длина мазерного усиления (в единицах а. е.), D — расстояние до источника (кпк), S — плотность потока от источника (Ян), $\Delta \nu_{H_2O} / \nu_{H_2O}$ — отношение ширины мазерной линии к ее частоте покоя (в ед. 10^{-6}).

Подставив известные и измеренные значения, имеем: $q_e^r \approx 10^{-6}$ см³/сек [26], $E_r = 1.5 \cdot 10^{-16}$ эрг, $T_e \approx 1500$ К, $T_H \approx 1665$ К, $(T_H - T_e) / T_H \approx 0.1$, $l \approx 3 \cdot 10^{13}$ см ≈ 2 а. е. (три мазерные конденсации размерами 10^{13} см каждая),

$D \approx 0.14$ кпк, $S \approx 6.5 \cdot 10^4$ Ян, $\Delta \nu_{\text{H}_2\text{O}}/\nu_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2.7$. После чего мы имеем $n_1 n_e \geq 2.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-6}$. Нижние оценки на n_1 и n_e ($n_1 \approx 1.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, $n_e \approx 1.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$) находятся в согласии с теоретическими расчетами физических условий в областях излучения мазеров воды [25]. Результаты также подтверждают ранние работы по изучению мазерного излучения в *Orion KL*, где значения $n_e/n_H \approx 10^{-5}$ и $n_H \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ были получены на основе разумных предположений [18].

Какие процессы могут обеспечить такие физические характеристики среды (как температуру, плотность окружающей среды и уровень ионизации)? Один из эффективных механизмов увеличения плотности среды — это действие звездного ветра [18, 22, 24]. В этом случае мазерные источники H_2O являются местами взаимодействия звездного ветра и газовых конденсаций в его оболочке. Следует упомянуть еще один источник, который может обеспечить высокую плотность газа и подходящие условия для возникновения мазерного излучения — магнитогидродинамическую турбулентность газа. Турбулентность может дать энергию для *CCr*-накачки в мелкомасштабных стохастических ударных волнах [27].

Наклон зависимости ширины линии от плотности потока для Вспышек 5, 7 (рис. 4, 5) предполагает, что мазерные пятна ведут себя как ненаасыщенные мазеры и могут иметь одинаковый источник возбуждения. Этот источник должен приводить к взрывному увеличению температуры, плотности среды компонентов мазера, испарению льда с поверхности пыли и созданию условий для эвакуации излучающих квантов из области мазера, например, более холодной пылью или квантами колебательного перехода молекулы H_2O , имеющими меньшую оптическую толщину. Предполагая, что наиболее вероятный механизм накачки мазера воды при мощных вспышках является *CCr*-накачка, источником инициирования ее могут быть именно ударные волны. Если это так, то скорость распространения ударной волны будет $v_{\text{распр}} = r/15$ дней. Здесь r — размер мазерной конденсации, 15 дней — длительность Вспышки 6 или 7, например. Если принять размер $r = 0.5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ (как в *Orion KL*) получаем $v \approx 60 \text{ км/с}$. Это значение скорости более чем на порядок выше, чем скорость звука в рассматриваемой среде излучения мазера воды.

Полученные новые данные чрезвычайно важны, поскольку они указывают на то, что области мазерного излучения имеют кластерную структуру с высокой плотностью мазерных пятен, обеспечивающих возникновение длительного и мощного мазерного излучения сериями вспышек, частично накладывающихся друг на друга и находящихся на луче зрения наблюдателя. Вспышки имеют близкие скорости мазерных линий, что может свидетельствовать о тесном расположении мазерных пятен.

5. Выводы

1. Приведены данные детальных наблюдений мазера воды в направлении протозвездного комплекса *IRAS 16293-2422*, выполненных в течение более двух лет.

2. Зарегистрировано необычное по мощности и длительности вспышечное явление вблизи -1.5 км/с, состоящее из многих вспышек мазера воды, исходящих из близко расположенных друг к другу мазерных пятен, возможно, находящихся в одном мазерном скоплении.

3. Получены важные физические параметры вспышек мазера.

4. Установлено наличие каскадного усиления мазера в случаях возникновения этих мощных коротких вспышек.

5. Вспышки мазера воды следуют друг за другом и создают для последующих вспышек все возрастающие значения плотности потока, создавая рост плотности потока продолжительного вспышечного явления в течение нескольких месяцев, после чего также в течение нескольких месяцев наблюдался спад активности вспышек.

6. Мощные вспышки мазера воды указывают на то, что сами мазеры находятся в ненасыщенном состоянии.

7. Высказано предположение о том, что мазеры воды локализованы в пределах газово-пылевых протопланетных дисках молодого протозвездного комплекса *IRAS 16293-2422*.

Благодарности

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 в части обработки и анализа данных РТ-22.

Список литературы

1. SMA Observations of Class 0 Protostars : a High Angular Resolution Survey of Protostellar Binary Systems / X. Chen, H. G. Arce, Q. Zhang [et al.] // *ApJ*. 2013. Vol. 768. 31 p.
2. The VLA/ALMA Nascent Disk and Multiplicity (VANDAM) Survey of Orion Protostars. II. A Statistical Characterization of Class 0 and Class I Protostellar Disks / J. J. Tobin, P. D. Sheehan, S. T. Megeath [et al.] // *ApJ*. 2020. Vol. 890. 93 p.
3. A revised distance to *IRAS 16293-2422* from VLBA astrometry of associated water masers / S. A. Dzib, G. N. Ortiz-León, A. Hernandez-Gomez [et al.] // *A&A*. 2018. Vol. 614. Id. A20. 12 p.
4. Spectroscopic Evidence for Infall around an Extraordinary *IRAS* Source in Ophiuchus / C. K. Walker, C. J. Lada, E. T. Young [et al.] // *ApJ*. 1986. Vol. 309. P. L47—L51.
5. Physical conditions in the *IRAS 16293-2422* parent cloud / K. M. Menten, E. Serabyn, R. Guesten, T. L. Wilson // *A&A*. 1987. Vol. 177, no. 1-2. P. L57—L60.

6. Sargent A. I., Beckwith S. Kinematics of the Circumstellar Gas of HL Tauri and R Monocerotis // *ApJ*. 1987. Vol. 323. P. 294—305.
7. Water around IRAS 15398-3359 observed with ALMA / P. Bjerkeli, J. K. Jørgensen, E. A. Bergin [et al.] // *A&A*. 2016. Vol. 595. Id. A39. 8 p.
8. Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I / T. Hirota, M. N. Machida, Y. Matsu-shita [et al.] // *Nature Astronomy*. 2017. Vol. 1. Id. 0146.
9. Wootten A. The Duplicity of IRAS 16293-2422 : A Protobinary Star? // *ApJ*. 1989. Vol. 337, no. 2. P. 858—864.
10. Wootten A., Loren R. B. L1689N : Misalignment between a Bipolar Outflow and a Magnetic Field // *ApJ*. 1987. Vol. 317. P. 220—230.
11. Astrometry of H₂O Masers in Nearby Star-Forming Regions with VERA I. IRAS 16293-2422 in ρ Oph East / H. Imai, K. Nakashima, I. Bushimata [et al.] // *PASJ*. 2007. Vol. 59, no. 6. P. 1107—1113.
12. Радиометр на частоту 22 ГГц для международной РСДБ станции «СИМЕИЗ» / Нестеров Н. С., Вольвач А. Е., Стрелка И. Д. [и др.] // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Т. 5, № 3. С. 320—322.
13. Goldreich P., Kwan J. Astrophysical Masers. IV. Line Widths // *ApJ*. 1974. Vol. 190, no. 1. P. 27—34.
14. Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05 / A. Volvach, L. Volvach, M. Larionov [et al.] // *MNRASL*. 2019. Vol. 482, iss. 1. P. L90—L92.
15. Volvach A., Volvach L., Larionov M. Unusually powerful flare activity of the H₂O maser feature near a velocity of -60 km s^{-1} in W49N // *MNRASL*. 2020. Vol. 496, iss. 1. P. L147—L151.
16. Flaring water masers associated with W49N / Volvach A., Volvach L., Larionov M. [et al.] // *A&A*. 2019. Vol. 628. P.A89.
17. Volvach A., Volvach L., Larionov M. Composite powerful short flare of water maser emission in IRAS 16293-2422 // *MNRASL*. 2021. Vol. 507, no. 1. P. L52—L56.
18. Strel'nikskiy V. Collision-collision pumping of cosmic masers // *Soviet Ast. Let.* 1980. Vol. 6. P. 196—199.
19. Collisional Excitation of Interstellar Waters / A. Palma, S. Green, D. DeFrees, A. McLean // *ApJ*. 1988. Vol. 68. P. 287—318.
20. Shmeld I., Strel'nitski V., Muzulev V. Collisional pumping of a cosmic H₂O maser in a shock wave // *Soviet Ast.* 1976. Vol. 20. P. 411—418.
21. Kylafis N., Norman C. On Pumping Astronomical Masers // *ApJ*. 1986. Vol. 300, no. 2. P. L73—L77.
22. Pikelner S. B., Strel'nitskii V. S. Models of Cosmic Maser Sources // *Astrophysics and Space Science*. 1976. Vol. 39. P. L19.
23. Strel'nitskiy V. S., and Sunjaev R. A. Pumping of Strong H₂O Cosmic Masers // *Astron. Zh.* 1972. Vol. 49. P. 704—711.
24. Norman C., Silk J. Interstellar bullets : H₂O masers and Herbig-Haro objects // *Astrophysical Journal*. 1979. Vol. 228. P. 197—205.
25. Strel'nitskii V. S. On the nature of the strong cosmic H₂O masers // *MNRAS*. 1984. Vol. 207. P. 339—354.
26. Itikawa Yu. Rotational Transition in an Asymmetric-Top Molecule by Electron Collision : Applications to H₂O and H₂CO // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1972. Vol. 32, iss. 1. P. 217—226.
27. H₂O masers and supersonic turbulence / V. S. Strel'nitski, J. Alexander, S. Gezari [et al.] // *ApJ*. 2002. Vol. 581. P.1180—1193.

Информация об авторах

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

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

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

Super-Powerful Flare Phenomenon of the Water Maser in the Protostellar System IRAS 16293-2422

L. N. Volvach¹, A. E. Volvach¹, and M. G. Larionov²

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

²Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117997, Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: March 24, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Based on long-term monitoring of the water vapor maser at 22.2 GHz from early 2019 to March 2021, the most powerful flare event in the entire history of observations was recorded in the protostellar system IRAS 16293-2422 at a velocity of about -1.5 km s^{-1} , lasting of about two years. The maser emission came from the largest structure of maser spots, the high density of which created their partial overlap in time. The total number of individual flares of the water maser reached ten. Due to the high detail of the data obtained, recorded at intervals of 1–2 days, new unique results were obtained. The existence of such a complex configuration of emitting maser spots with very similar radial velocities located on the observer's line of sight was confirmed for the first time. It was possible to establish that the masers of powerful flares were in an unsaturated state due to the cascade pumping of several masers on the observer's line of sight. New important parameters of water masers have been obtained, and an assumption has been made about their localization in the gas-dust structure IRAS 16293-2422.

Keywords: star formations, stars with exoplanet, molecules, radio lines, water masers.

For citation (IEEE): L. N. Volvach, A. E. Volvach, and M. G. Larionov, “Super-Powerful Flare Phenomenon of the Water Maser in the Protostellar System IRAS 16293-2422,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 153–168, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.11. (In Russ.).

References

- [1] X. Chen et al., “SMA Observations of Class 0 Protostars: a High Angular Resolution Survey of Protostellar Binary Systems,” *The Astrophysical Journal*, vol. 768, no. 2, p. 110, Apr. 2013, doi: 10.1088/0004-637x/768/2/110.
- [2] J. J. Tobin et al., “The VLA/ALMA Nascent Disk and Multiplicity (VANDAM) Survey of Orion Protostars. II. A Statistical Characterization of Class 0 and Class I Protostellar Disks,” *The Astrophysical Journal*, vol. 890, no. 2, p. 130, Feb. 2020, doi: 10.3847/1538-4357/ab6f64.

- [3] S. A. Dzib et al., "A revised distance to IRAS 16293-2422 from VLBA astrometry of associated water masers," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 614, p. A20, Jun. 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201732093.
- [4] C. K. Walker, C. J. Lada, E. T. Young, P. R. Maloney, and B. A. Wilking, "Spectroscopic evidence for infall around an extraordinary IRAS source in Ophiuchus," *The Astrophysical Journal*, vol. 309, p. L47, Oct. 1986, doi: 10.1086/184758.
- [5] K. M. Menten, E. Serabyn, R. Guesten, and T. L. Wilson, "Physical conditions in the IRAS 16293-2422 parent cloud," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 177, pp. L57–L60, 1987.
- [6] A. I. Sargent and S. Beckwith, "Kinematics of the circumstellar gas of HL Tauri and R Monocerotis," *The Astrophysical Journal*, vol. 323, p. 294, Dec. 1987, doi: 10.1086/165827.
- [7] P. Bjerkeli et al., "Water around IRAS 15398–3359 observed with ALMA," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, p. A39, Oct. 2016, doi: 10.1051/0004-6361/201628795.
- [8] T. Hirota et al., "Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I," *Nature Astronomy*, vol. 1, no. 7, Jun. 2017, doi: 10.1038/s41550-017-0146.
- [9] A. Wootten, "The Duplicity of IRAS 16293-2422: A Protobinary Star?," *The Astrophysical Journal*, vol. 337, p. 858, Feb. 1989, doi: 10.1086/167156.
- [10] A. Wootten and R. B. Loren, "L1689N – Misalignment between a bipolar outflow and a magnetic field," *The Astrophysical Journal*, vol. 317, p. 220, Jun. 1987, doi: 10.1086/165270.
- [11] H. Imai et al., "Astrometry of H₂O Masers in Nearby Star-Forming Regions with VERA I. IRAS 16293-2422 in ρ Oph East," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 59, no. 6, pp. 1107–1113, Dec. 2007, doi: 10.1093/pasj/59.6.1107.
- [12] N. S. Nesterov, A. E. Volvach, I. D. Strepka et al., "22 GHz Radiometer for International VLBI Station SYMEIZ," *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 5, no. 3, pp. 320–322, 2000. (In Russ.).
- [13] P. Goldreich and J. Kwan, "Astrophysical Masers.IV. Line Widths," *The Astrophysical Journal*, vol. 190, p. 27, May 1974, doi: 10.1086/152843.
- [14] L. N. Volvach et al., "Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 482, no. 1, pp. L90–L92, Oct. 2018, doi: 10.1093/mnrasl/sly193.
- [15] A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, "Unusually powerful flare activity of the H₂O maser feature near a velocity of -60 km s^{-1} in W49N," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 496, no. 1, pp. L147–L151, Jun. 2020, doi: 10.1093/mnrasl/slaa104.
- [16] L. N. Volvach et al., "Flaring water masers associated with W49N," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 628, p. A89, Aug. 2019, doi: 10.1051/0004-6361/201935521.
- [17] A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, "Composite powerful short flare of water maser emission in IRAS 16293-2422," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 507, no. 1, pp. L52–L56, Aug. 2021, doi: 10.1093/mnrasl/slab096.
- [18] V. Strel'nitskiy, "Collision-collision pumping of cosmic masers," *Soviet Ast. Let.*, vol. 6, pp. 196–199, 1980.
- [19] A. Palma, S. Green, D. J. Defrees, and A. D. McLean, "Collisional excitation of interstellar water," *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 68, p. 287, Oct. 1988, doi: 10.1086/191289.
- [20] I. Shmeld, V. Strel'nitskiy, and V. Muzulev, "Collisional pumping of a cosmic H₂O maser in a shock wave," *Soviet Ast.*, vol. 20, pp. 411–418, 1976.
- [21] N. D. Kylafis and C. Norman, "On pumping astronomical masers," *The Astrophysical Journal*, vol. 300, p. L73, Jan. 1986, doi: 10.1086/184606.

- [22] S. B. Pikel'ner and V. S. Strel'nitskiy, "Models of cosmic maser sources," *Astrophysics and Space Science*, vol. 39, no. 2, pp. L19–L24, Feb. 1976, doi: 10.1007/bf00648350.
- [23] V. S. Strel'nitsky and R. A. Sunjaev, "Pumping of Strong H₂O Cosmic Masers," *Astron. Zh.*, vol. 49, pp. 704–711, 1972.
- [24] C. Norman and J. Silk, "Interstellar bullets – H₂O masers and Herbig-Haro objects," *The Astrophysical Journal*, vol. 228, p. 197, Feb. 1979, doi: 10.1086/156836.
- [25] V. S. Strel'nitsky, "On the nature of the strong cosmic H₂O masers," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 207, no. 2, pp. 339–354, Mar. 1984, doi: 10.1093/mnras/207.2.339.
- [26] Y. Itikawa, "Rotational Transition in an Asymmetric-Top Molecule by Electron Collision: Applications to H₂O and H₂CO," *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 32, no. 1, pp. 217–226, Jan. 1972, doi: 10.1143/jpsj.32.217.
- [27] V. Strel'nitsky, J. Alexander, S. Gezari, B. P. Holder, J. M. Moran, and M. J. Reid, "H₂O Masers and Supersonic Turbulence," *The Astrophysical Journal*, vol. 581, no. 2, pp. 1180–1193, Dec. 2002, doi: 10.1086/344244.

Information about the authors

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

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

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

Nanophoton Generator of Picosecond Pulses

N. F. Karushkin¹ and I. A. Obukhov²

¹Scientific Research Institute “Orion”

Kiev, 03057, Ukraine

nkarushkin001@gmail.com

²Scientific-Industrial Company “Radiotechnika”, Moscow, Russian Federation

iao001@mail.ru

Received: March 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Results of theoretical analyses of possibility of generations of periodic picosecond pulses of voltage are presented. This process is possible under condition of external electromagnetic radiation only. As an active element of such generator may be heterojunction in which the relaxation instability of electron concentration is developed. The possible variant of heterostructure and its static and time depended electric characteristics are demonstrated. Parameters of heterostructure and operating regimes can be select so that pulses of voltage will be in terahertz range.

Keywords: nanophotonics, generation, heterojunction, relaxation instability, picosecond pulses, terahertz frequency range, indium antimonide, bismuth.

For citation (IEEE): N. F. Karushkin and I. A. Obukhov, “Nanophoton Generator of Picosecond Pulses,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 169–184, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.12.

1. Introduction

In papers [1, 2] were demonstrated that under some conditions in region near heterojunction between materials with different properties may develop the specific instability named as relaxation instability. Earlier this effect was suggested to be used for generation of electromagnetic waves of terahertz frequency range [3, 4].

Creation of such generator based on indium antimonide nanowires matrix is complex task that not solve before now. Here we present more simple construction that, as we hope, may be to realize with less difficulty.

2. Potential relief and static electric characteristics of heterostructure

As follow from results of papers [1, 2] for creation of conditions for relaxation instability development there is enough the structure consists of three heterojunctions that be formed the potential relief as presented on fig. 1. The left and right regions of this potential belonging to areas $[x_0, x_e]$ и $(x_c, x_1]$ correspond to contacts. Points x_e, x_j, x_c represent the conditional (“metallurgical”) boundaries of heterojunctions.

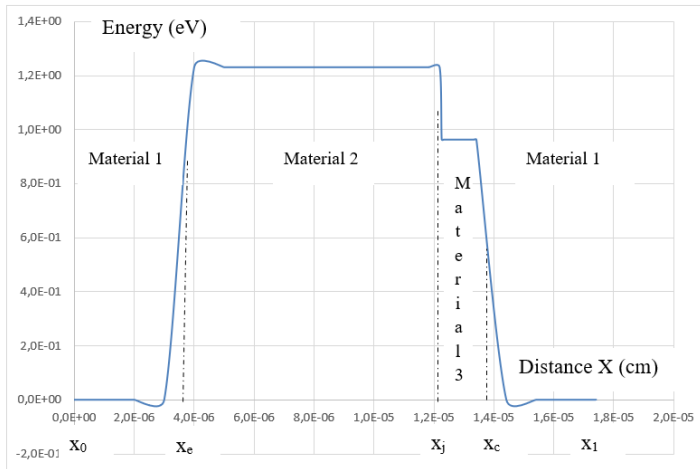


Fig. 1. Potential relief for electrons under zero voltage

For description of charge transport in this structure we will use the multi-component model [5]. Suppose that electron gas is the mix of two components: component a is the electrons with energy more than maximum of potential; component b – is the electrons with energy less than maximum of potential. Then approximate one-dimensional equations for concentrations (n_a, n_b) and current densities (j_a, j_b) of such electrons may be wrote as [1, 2, 5]

$$\begin{aligned} \partial n_a / \partial t + e^{-1} \partial j_a / \partial x &= -\hbar^{-1} (F_a - F_b) (n_a + n_b), \\ \partial n_b / \partial t + e^{-1} \partial j_b / \partial x &= -\hbar^{-1} (F_b - F_a) (n_a + n_b). \end{aligned} \quad (1)$$

Here e is the elementary charge; $\hbar$ is the reduced Planck constant; $F_{a,b}$ are the chemical potentials of a and b electrons.

Addition to equations (1) for self-consistent description of charge transport in heterostructure the Schrödinger and Poisson equations are necessary [2, 5]. The rations between electron concentrations, current densities and theirs

waves functions, chemical potentials and temperature are need. The rations between potential relief of heterostructure and electrostatic potential, zone structure and electron affinities of different materials and so on are necessary too. All these formulas and definitions are presented in papers [2, 5].

Equations (1) may be rewrite as

$$\begin{aligned}\partial n / \partial t + e^{-1} \partial j / \partial x &= 0, \\ \partial(n_a - n_b) / \partial t + e^{-1} \partial(j_a - j_b) / \partial x &= -(2/\hbar)(F_a - F_b),\end{aligned}\quad (2)$$

where $n = n_a + n_b$, $j = j_a + j_b$. First from equation (2) is the electron flux density conservation law, and second equation describe the dynamic of electrons chemical potentials difference.

Considering that temperature T is constant and neglecting by tunneling, we write

$$\partial n_{a,b} / \partial t = \Theta^{-1} \alpha_{a,b} \partial F_{a,b} / \partial t, j_{a,b} \approx -\sigma_{a,b} \partial F_{a,b} / \partial x. \quad (3)$$

Here

$$\Theta = kT, \alpha_{a,b} = \Theta \partial n_{a,b} / \partial F_{a,b} > 0, \sigma_{a,b} = -\partial j_{a,b} / \partial (\partial F_{a,b} / \partial x) > 0, \quad (4)$$

k is the Boltzmann constant.

The values $\alpha_{a,b}$ have a dimension of concentration and are the electron concentrations in the case of Boltzmann statistics. The values $\sigma_{a,b}$ are the conductivities of electrons which allows, using the ratios

$$\mu_{a,b} = \sigma_{a,b} / \alpha_{a,b}, \quad (5)$$

introduce the generalized mobilities $\mu_{a,b}$.

From equations (2) taking into account definitions (3) – (5) will obtain

$$\begin{aligned}\alpha_+ \partial F_+ / \partial t + \alpha_- \partial F_- / \partial t &= (\Theta/e) \partial [\sigma_+ \partial F_+ / \partial x + \sigma_- \partial F_- / \partial x] / \partial x, \\ (\alpha_a \alpha_b / \alpha_+) \partial F_- / \partial t - (\Theta/e) \partial [(\alpha_a \alpha_b \mu_a \mu_b / \sigma_+) \partial F_- / \partial x] / \partial x &= \\ = (\Theta/e) \{ (en/\hbar) F_- - (\partial j / \partial x) [\alpha_a \alpha_b (\mu_a - \mu_b) / \alpha_+ \sigma_+] - & \\ - (j/2) \partial (\sigma_+ / \sigma_-) / \partial x \}, &\end{aligned}\quad (6)$$

and the ratio is right

$$j = -(\sigma_+ / 2) \partial F_+ / \partial x - (\sigma_- / 2) \partial F_- / \partial x. \quad (7)$$

Here

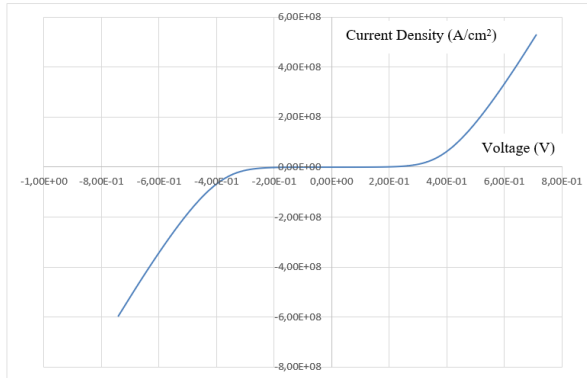
$$F_{\pm} = F_a \pm F_b, \alpha_{\pm} = \alpha_a \pm \alpha_b, \sigma_{\pm} = \sigma_a \pm \sigma_b. \quad (8)$$

The chemical potentials on contacts must be equal to bias voltage with the reverse sign and multiplied to elementary charge. Therefore in points x_0 and x_1 we will assume

$$F_-(x_{0,1}) = 0, F_+(x_0) = 0, F_+(x_1) = -2eV, \quad (9)$$

where V is difference of the potentials between contacts.

a)



b)

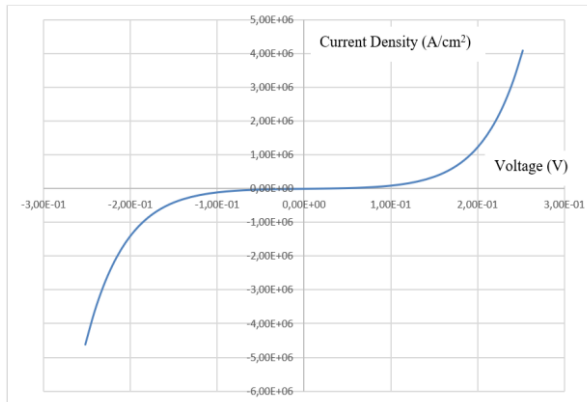


Fig. 2. Current-Voltage Characteristics of structure, presented on Fig. 1:
a – full characteristic, b – characteristic under low voltage

Detail analyses of static current-voltage characteristics of structure demonstrated on fig. 1 and factors defining their features is presented in book [2]. On fig. 2 the current-voltage characteristic of structure is shown. Nonlinear characteristic under low voltage is caused by nonequilibrium of electron gas.

Source of nonequilibrium is the current that flow perpendicular to heterojunction in point x_j . In accordance with equations (6) in static case when $j = j_0 = \text{const}$ the level of nonequilibrium may be calculate by approximate formula

$$F_-(x_j) = ej_0r_j, \quad (10)$$

where

$$r_j = (\hbar/e^2)/(n(x_j)d_j), d_j^{-1} = -(1/2)\partial(\sigma_+/\sigma_-)/\partial x. \quad (11)$$

Value r_j is specific resistance of heterojunction in point x_j , d_j is effective width of this heterojunction, value $r_0 = \hbar/e^2 \approx 4,11 \text{ k}\Omega$ often referred to as fundamental resistance.

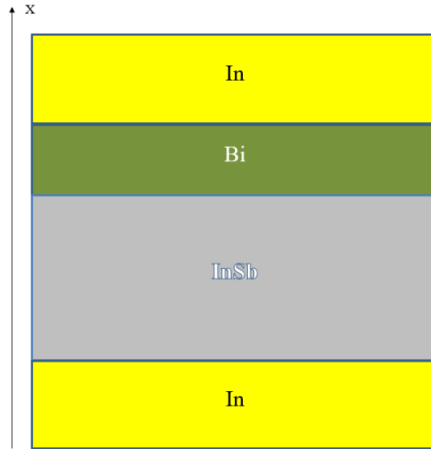


Fig. 3. Possible material realization of structure, presented on Fig. 1

Calculation of current-voltage characteristic was carried out at room temperature $T = 300 \text{ K}$ for structure in which as material 1 was indium (In), as material 2 was indium antimonide (InSb) and as material 3 was bismuth (Bi) as demonstrated on fig. 3. Influence of size effects to electron concentration and electron mobilities was taken to account [6, 7].

For the lengths

$$L_e = x_j - x_e, L_c = x_c - x_j \quad (10)$$

accepted the values $L_e = 72,0 \text{ nm}$, $L_c = 12,3 \text{ nm}$. They were selected so that dimensional quantization significantly reduces the electrons concentration in bismuth, but, at the same time, resistance of the device passive regions at low voltages would be much less than the resistance of the heterojunction r_j .

3. Conditions of relaxation instability development

Let for researched heterostructure some constant current density j_0 and voltage V_0 are correspond to stationary solution $F_{\pm}^0$ of task (6), (9). Let small fluctuations $F_{\pm}^1$ from this solution arose for some reason. Then

$$F_{\pm} = F_{\pm}^0 + F_{\pm}^1, \quad (11)$$

and conditions

$$|F_{\pm}^1| \ll |F_{\pm}^0|. \quad (12)$$

are satisfied.

In the areas $x \in (x_e, x_j) \cup (x_j, x_c)$ that do not include the small neighborhoods of the heterojunctions in the points x_e , x_j and x_c from equations (6) and (7) we obtain the approximate equations

$$\begin{aligned} \alpha_+ \partial F_+^1 / \partial t + \alpha_- \partial F_-^1 / \partial t &= -(2\Theta/e)(\partial j^1 / \partial x), \\ (\alpha_a \alpha_b / \alpha_+) \partial F_-^1 / \partial t - (\Theta/e)(\alpha_a \alpha_b \mu_a \mu_b / \sigma_+) \partial^2 F_-^1 / \partial x^2 &= \\ &= -\tau_0^{-1} n_0 F_-^1 - (F_-^0 / 2\hbar)(\alpha_+ F_+^1 + \alpha_- F_-^1) - \\ &\quad - (\Theta/e)(\partial j^1 / \partial x)[\alpha_a \alpha_b (\mu_a - \mu_b) / \alpha_+ \sigma_+], \\ j^1 &= -(\sigma_+ / 2) \partial F_+^1 / \partial x - (\sigma_- / 2) \partial F_-^1 / \partial x, \end{aligned} \quad (13)$$

where

$$\tau_0 = \hbar / \Theta. \quad (14)$$

All coefficients here are calculate under conditions $F_{\pm}^1 = 0$.

At some point x in considered area let assume

$$F_{\pm}^1(x, t) = F_{\pm}^1(q) \exp\{-\gamma t\} \cos(qx). \quad (15)$$

Substituting expression (15) into equations (13) and preserving terms that linear by deviations from stationary solution leads to the system of two homogeneous algebraic equations of the first order for amplitudes $F_{\pm}^1(q)$

$$\begin{aligned} \gamma(\alpha_a \alpha_b / \alpha_+) F_-^1 - (q^2 \Theta / e)(\alpha_a \alpha_b \mu_a \mu_b / \sigma_+) F_-^1 - \\ - \tau_0^{-1} n_0 F_-^1 - (F_-^0 / 2\hbar)(\alpha_+ F_+^1 + \alpha_- F_-^1) + \\ + (q^2 \Theta / 2e)(\mu_a - \mu_b)(\alpha_a \alpha_b / \alpha_+ \sigma_+)(\sigma_+ F_+^1 + \sigma_- F_-^1) = 0, \\ \gamma(\alpha_+ F_+^1 + \alpha_- F_-^1) - (q^2 \Theta / e)(\sigma_+ F_+^1 + \sigma_- F_-^1). \end{aligned} \quad (16)$$

System (16) have nontrivial solutions if its determinant equal zero only, from which follows

$$\gamma^2 - \gamma \tau_0^{-1} \vartheta + \tau_0^{-2} \Delta = 0, \quad (17)$$

where

$$\vartheta = \xi_a^2 + \xi_b^2 + \beta, \Delta = \xi_a^2 \xi_b^2 + (\beta_b \xi_a^2 + \beta_a \xi_b^2) - (\tau_0/\tau_F)(\xi_a^2 - \xi_b^2), \quad (18)$$

$$\xi_{a,b} = qL_{a,b}, \beta = \beta_a + \beta_b, \beta_{a,b} = n_0/\alpha_{a,b}, \tau_F = \hbar/F^0, \quad (19)$$

$$L_{a,b} = (\hbar\mu_{a,b}/e)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

are the lengths of a and b electrons relaxations to the state of chemical equilibrium.

The value τ_F may be interpreted as an average transit time of nonequilibrium electrons through heterojunction. Indeed, from expressions (19), (10) and (11) follow that

$$\tau_F = d_j/v_j(x_j),$$

where

$$v_j(x_j) = j_0/en(x_j)$$

is average speed of electrons in heterojunction.

Values ϑ and τ_0 are positive, therefore (see book [8]) it is possible three types of singularities of equations (13) only:

- stable nodal point when $0 < 4\Delta < \vartheta^2$, and $Im(\gamma_{1,2}) = 0, Re(\gamma_{1,2}) > 0$;
- stable focus point when $\vartheta^2 < 4\Delta$, and $Im(\gamma_{1,2}) \neq 0, Re(\gamma_{1,2}) > 0$;
- saddle point when $\Delta < 0$, and $Im(\gamma_{1,2}) = 0, Re(\gamma_1) > 0, Re(\gamma_2) < 0$.

Stable focus point correspond to existence of relaxed periodic oscillations in structure with frequencies

$$\omega_{1,2} = Im(\gamma_{1,2}) = \pm(1/2\tau_0)[-(4\tau_0/\tau_F)(\xi_a^2 - \xi_b^2) - (\xi_a^2 - \xi_b^2)^2 - 2(\beta_a - \beta_b)(\xi_a^2 - \xi_b^2) - \beta^2]^{1/2}, \quad (21)$$

and decrement

$$\lambda = Re(\gamma_{1,2}) = (1/2\tau_0)(\xi_a^2 + \xi_b^2 + \beta). \quad (22)$$

It is possible only if the following conditions are satisfied

$$q \neq 0, \quad (23)$$

$$\mu_a \neq \mu_b \quad (24)$$

and

$$(4\tau_0/\tau_F)(\xi_a^2 - \xi_b^2) < -\{[(\xi_a^2 - \xi_b^2) + (\beta_a - \beta_b)]^2 + 4\beta_a\beta_b\}. \quad (25)$$

Condition (23) require the existence of space-periodic perturbations of chemical potentials of electrons in the structure. For example, such perturbations may be caused by external electromagnetic wave with small amplitude in wavelength range less than red boundary of absorption.

Conditions (24) refer to local generalized mobilities in point and do not refer to mobilities in different materials directly. Values $\mu_a(x)$ and $\mu_b(x)$ in the case of nanometer sizes of structure layers significantly depend from many factors that determine the probabilities of electrons stochastic scattering under different energies. Taking these factors into account is very difficult task. Therefore, for certainty of further estimations we will assume that near the heterojunction placed in point x_j ,

$$\mu_a > \mu_b. \quad (26)$$

If inverse inequality will satisfied, then in further expressions will necessary to change signs of all currents densities.

From formulas (10), (11), (19) and (25) follows the expression for boundary current density for relaxed oscillations development

$$j_\omega = (\Theta/4er_j)\{[(\xi_a^2 - \xi_b^2) + (\beta_a - \beta_b)]^2 + 4\beta_a\beta_b\}/|\xi_a^2 - \xi_b^2|. \quad (27)$$

Value j_ω is positive. If inequality (26) is true, then relaxed oscillations of chemical potentials and electron concentrations in structure will develop when $j < -j_\omega$, in alternative case they will develop when $j > j_\omega$.

Saddle region correspond to relaxation instability of chemicals potentials and electron concentrations in structure. Necessary conditions of relaxation instability development are inequalities (23), (24) and next inequality

$$(\tau_0/\tau_F)(\xi_a^2 - \xi_b^2) > \xi_a^2\xi_b^2 + \beta_b\xi_a^2 + \beta_a\xi_b^2, \quad (28)$$

that define boundary current density of this effect

$$j_\kappa = (\Theta/er_j)(\xi_a^2\xi_b^2 + \beta_b\xi_a^2 + \beta_a\xi_b^2)/|\xi_a^2 - \xi_b^2|. \quad (29)$$

As well as j_ω value j_κ is positive. If inequality (26) is true, then relaxation instability in structure will develop when $j > j_\kappa$, in alternative case it will develop when $j < -j_\kappa$.

Value of current density equal j_κ is the bifurcation point for system of equations (13). Except for the solution described exponentially rapid relaxation of small perturbations of difference of electron chemical potentials with decrement

$$\gamma_1 = (1/2\tau_0)\{(\xi_a^2 + \xi_b^2 + \beta) + [(\xi_a^2 + \xi_b^2 + \beta)^2 - 4\xi_a^2\xi_b^2 - 4(\beta_b\xi_a^2 + \beta_a\xi_b^2) + (4\tau_0/\tau_F)(\xi_a^2 - \xi_b^2)]^{\frac{1}{2}}\}, \quad (30)$$

when $|j| > j_{\kappa}$ appear the solution that describe them exponentially rapid increasing with increment

$$\kappa = -\gamma_2 = (1/2\tau_0)\{[(\xi_a^2 + \xi_b^2 + \beta)^2 - 4\xi_a^2\xi_b^2 - 4(\beta_b\xi_a^2 + \beta_a\xi_b^2) + (4\tau_0/\tau_F)(\xi_a^2 - \xi_b^2)]^{1/2} - (\xi_a^2 + \xi_b^2 + \beta)\}. \quad (31)$$

As for electron concentrations the simple estimations are true

$$n_a \approx n_{a0}\exp\{F_-^1/2kT\}, n_b \approx n_{b0}\exp\{-F_-^1/2kT\}, \quad (32)$$

therefore, if condition (26) is satisfied, that a -electron concentration increase fasterly than difference of chemical potentials.

Corresponding to condition (28) instability of stationary task solution for electron chemical potentials develop in the case when the average transit time of nonequilibrium electrons through heterojunction area τ_F will become less than effective time of chemical potentials difference relaxation to zero

$$\tau_{rel} = \tau_0|\xi_a^2 - \xi_b^2|/(\xi_a^2\xi_b^2 + \beta_b\xi_a^2 + \beta_a\xi_b^2), \quad (33)$$

Thus, nonequilibrium electrons do not have time to relax in heterojunction neighborhood and them concentration in adjacent areas is increase.

If the initial equations (6), (7) were linear that the relaxation instability will leads to catastrophic decreasing of structure resistance, increasing of current and to irreversible electrical breakdown. Nonlinear dependance of electron concentrations from chemical potentials (see formulas (32)) and expressions (10), (11) make it possible the scenario in which increasing of concentrations will stop before the irreversible electrical breakdown will happen and difference F_-^1 will achieve nonzero but finite value [9]. As a result of such process the complex singular point named saddle-nodal will formed from which under some conditions the limit cycle will developed.

4. Stimulated generation of periodic picosecond pulses

As follow from condition (23) for relaxation instability or relaxed oscillations realization it is necessary small space-periodic perturbation of chemical potentials. Such perturbation may be created by external electromagnetic radiation with wavelength less than red boundary of absorption in structure. In this case the electron concentration and chemical potentials will change by internal photoeffect.

Boundary current density of relaxation instability and increment of instability increasing defined by expressions (29) and (31). At room temperature the estimations are true: $\Theta \approx 0,026 \text{ eV}$; $1/2\tau_0 \approx 19,8 \text{ THz}$; $L_{a,b} \sim 10^{-6} \text{ cm}$; $\beta, \beta_{a,b} \sim 1$. If

the width of heterojunction in point x_j is about lattice constant of indium antimonide (0,648 nm) then under zero voltage $r_j \sim 10^{-6} \Omega \times \text{cm}^2$.

From these estimations follow that if wavelength

$$\lambda = 1/q \quad (34)$$

of stimulating radiation satisfies inequalities

$$\lambda \gg L_{a,b} \rightarrow \xi_{a,b} \ll 1, \quad (35)$$

then boundary current density j_κ is about 10^4 A/cm^2 .

To ensure the picosecond duration of instability development the expression in figure bracket in formula (31) must be no less than 0,1. It may be reach by increasing of operating current density to one or two orders compared to j_κ and by maximum decreasing wavelength λ for the goal to increase values of $\xi_{a,b}$.

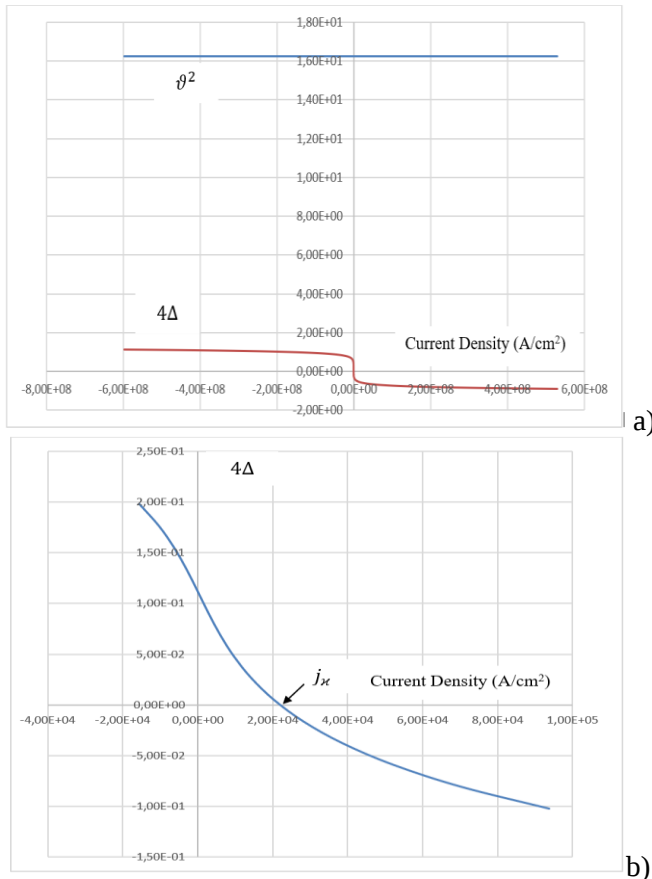


Fig. 4. Parameters θ^2 and 4Δ as functions of current density under condition $\lambda = 598 \text{ nm}$

On fig. 4 the typical behavior of parameters θ^2 and 4Δ as functions of current density is demonstrated. It can be seen (see fig. 4 a) that region of relaxed oscillations ($4\Delta > \theta^2$) is practically unattainable under reasonable values of current densities. Opposite the region of relaxation instability ($\Delta < 0$) is achievable easily. Boundary current density j_{κ} equal $2,83 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ when wavelength λ of stimulating radiation equal 598 nm that correspond to voltage equal $0,06 \text{ V}$ (see fig. 2 b).

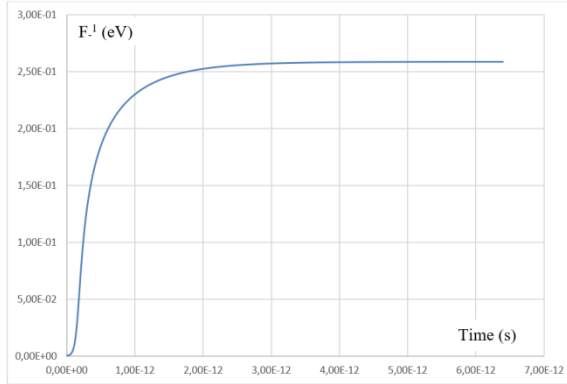


Fig. 5. Value F^1 near the heterojunction in point x_j as a function of time after short pulse of stimulating radiation with $\lambda = 598 \text{ nm}$

At wavelength equal 598 nm and current density equal $4,10 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ($V = 0,252 \text{ V}$) the increment of perturbation increasing is $32,6 \text{ THz}$. If stimulating radiation acts a very short period of time much less than $\tau_{\kappa} = 1/\kappa \approx 3,06 \times 10^{-14} \text{ s}$ then function $F^1(t)$ near the heterojunction reaches the limit value F^1_{max} equal $0,259 \text{ eV}$, as demonstrated on fig. 5, and stabilized in this level.

Note that the value F^1_{max} on fig. 5 is the same order as a bias voltage and conditions (12) at $(t - t_0) \gg \tau_{\kappa}$ not satisfy. Hereinafter, it is accepted that initial moment of time $t_0 = 0$. Presented results were obtained by numerical solution of task where in initial moment of time amplitude of perturbation was equal $0,00026 \text{ eV}$ only and satisfy to conditions (12). Numerical experiment demonstrated that if condition (12) satisfied in initial moment of time that value F^1_{max} do not depend from amplitude of perturbation practically.

In papers [4, 10] the experimental current-voltage characteristics of indium antimonide nanowires in matrix of alumina oxide with copper contacts were presented. Curves of current-voltage characteristics are nonmonotonic, they have hysteresis and jumps that analogical of demonstrated on fig. 6 b. These features may be interpreted as a result of electron gas relaxation instability in

heterojunction between nanowire and contact [1,2] stimulated by natural lighting. The rationale of such interpretation requires further careful experimental researches and calculations.

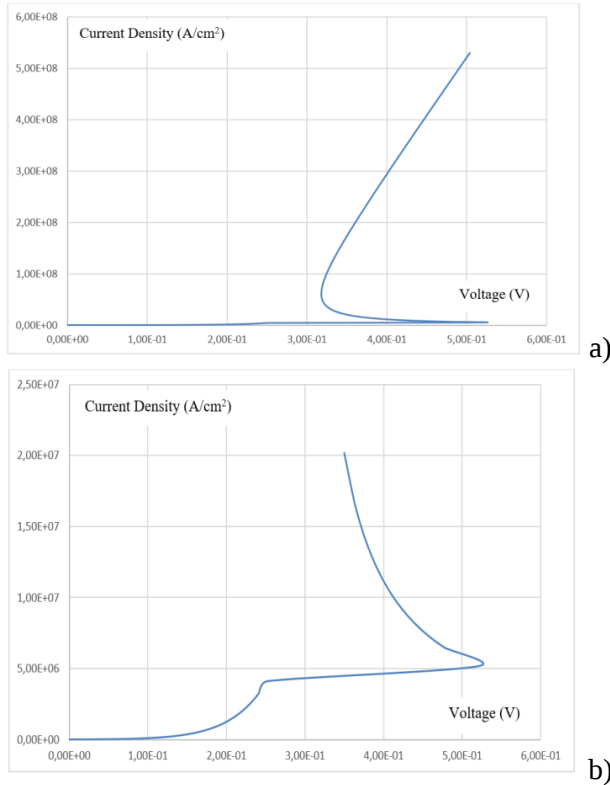


Fig. 6. Current-Voltage Characteristic of structure, presented on Fig. 1, after short pulse of stimulating radiation with $\lambda = 598 \text{ nm}$: a – characteristic under $V > 0$, b – range of characteristic with features caused by relaxation instability

When function $F_-^1(t)$ reaches the value F_{-max}^1 increment of perturbation increasing κ and parameter Δ become zeros. Saddle singular point of equation (13) turns to complex singular point saddle-nodal. If any new perturbations are absent the system may to be in such neutral state infinity long time. However, any new small perturbation of electron chemical potentials will change the parameter Δ and shift the system either towards of stable nodal or towards saddle back. In any of these two cases function $F_-^1(t)$ will exponentially decrease to zero.

As such perturbation may be the permanent stimulating electromagnetic radiation. If in this case the current density j_0 is constant that when function $F_-^1(t)$ will reach values near zero stimulating radiation may move the transport

equations solution to the exponentially increased branch again and process will repeat. Thus, in the systems the periodic process (limit cycle) appears.

On fig. 7 results of calculations of function $F_{-}^1(t)$ near the heterojunction in point x_j and difference of voltages $V - V_0$ on structure's contacts under different values wavelengths of stimulating radiation λ and current density j_0 are presented. Results of electron concentration calculations in the same space point that F_{-}^1 are demonstrated on fig. 8.

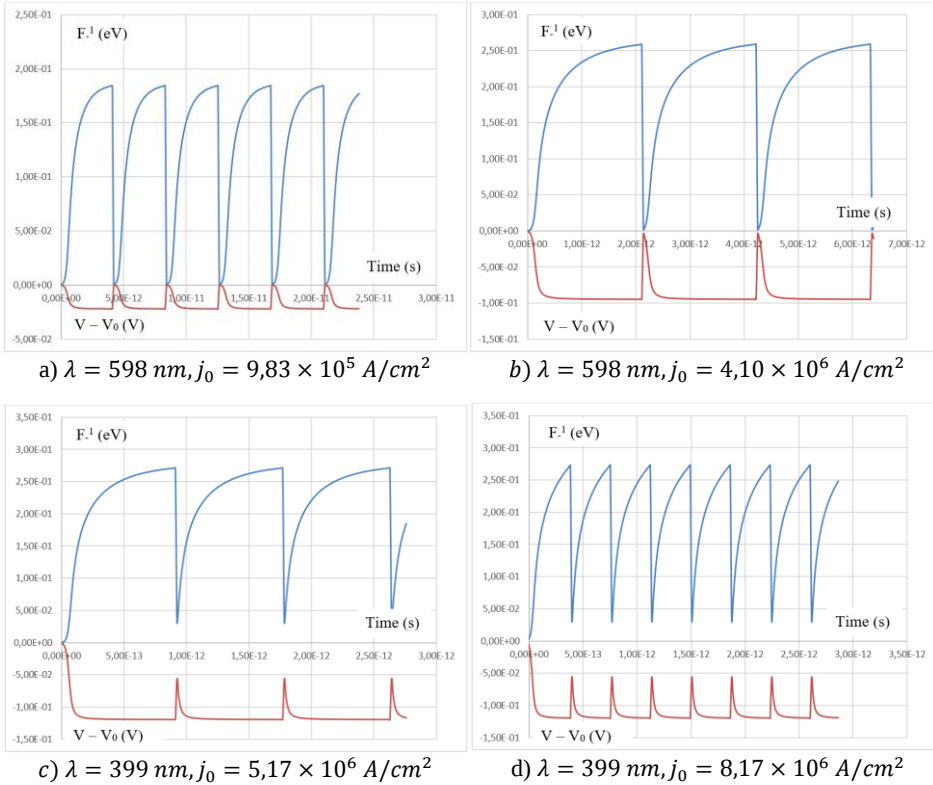


Fig. 7. F_{-}^1 and $V - V_0$ as functions of time under different current densities j_0 and wavelength of stimulating radiation λ

At constant current density the pulses of F_{-}^1 appear in the structure. As a result of these pulses, we see the periodic changes of electron concentration, resistance of structure and voltage on structure's contacts. Decreasing of wavelength λ and increasing of current density j_0 are lead to decreasing of pulses period and they frequency increasing. When $\lambda = 598 \text{ nm}$ four times increasing of current density change the frequency from 244 GHz to 474 GHz . When

$\lambda = 399 \text{ nm}$ one and a half times increasing of current density increase the frequency from $1,10 \text{ THz}$ to $2,61 \text{ THz}$. With increasing of current density, the amplitudes of electron concentrations pulses and voltage pulses first increase and then stabilize near some values.

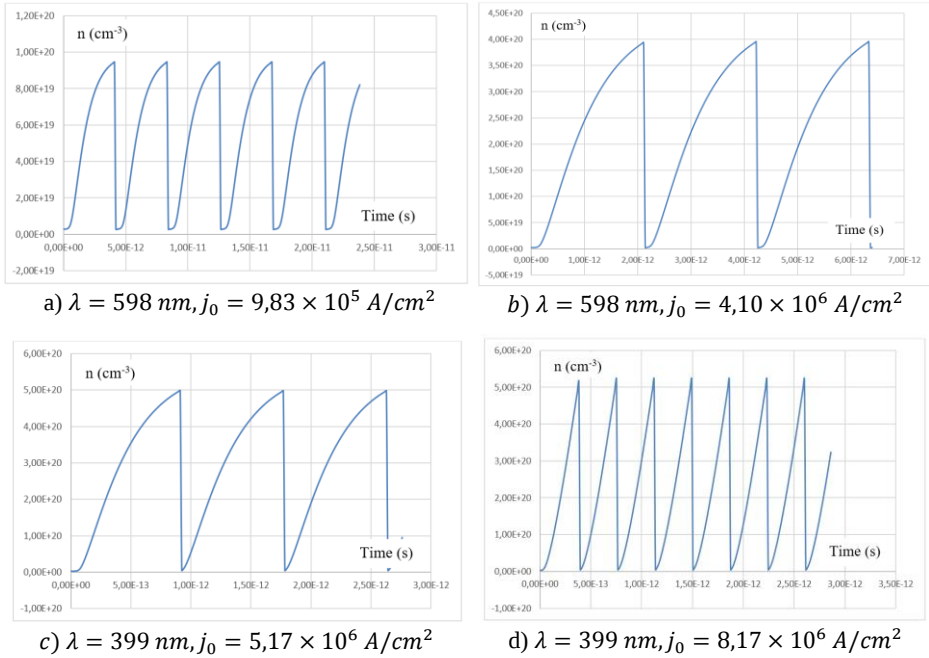


Fig. 8. Electron concentration n as a function of time under different current densities j_0 and wavelength of simulating radiation λ

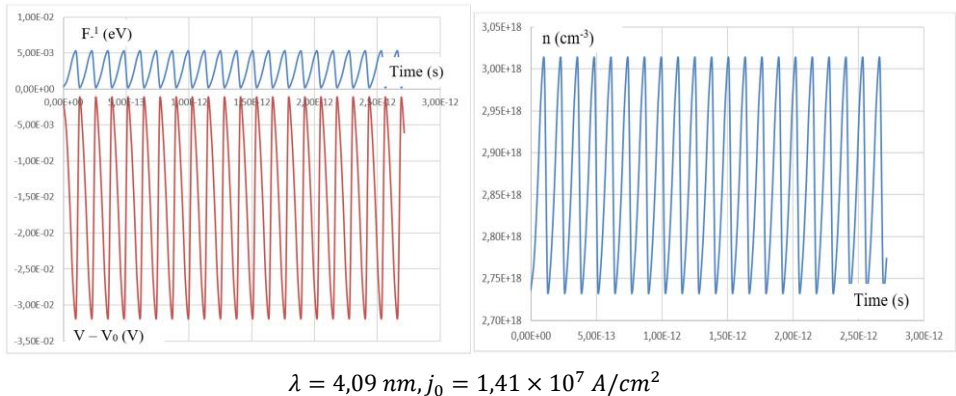


Fig. 9. F^1 , $V - V_0$ and electron concentration n as functions of time for very short wavelength

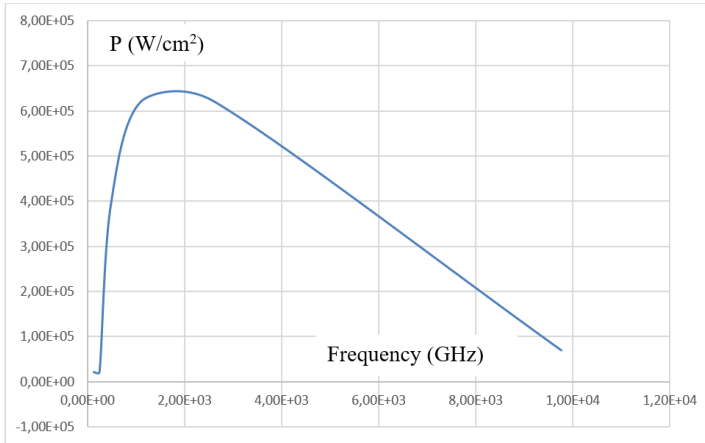


Fig. 10. Specific power as a function of pulses frequency

It is interesting to calculate the parameters of pulses when wavelength of stimulating radiation is very short. Results of such calculation for X-ray range ($\lambda = 4,09 \text{ nm}$) demonstrated on fig. 9. It can be seen that pulses frequency increase considerably (to $9,77 \text{ THz}$) but they amplitude decrease. The calculated dependance of specific power of radiation from frequency is presented on fig. 10. This curve confirms the noted trend.

5. Conclusion

Theoretical analysis of electric current flow through heterojunction shows that under some conditions in area near heterojunction may developed instability leads to fast increasing of small perturbations of electron concentration. This increasing is limited by nonlinear dependance of electron concentration from chemical potentials. The process may reach to the irreversible electrical breakdown of structure or to electron concentration stabilization in some new nonequilibrium level.

Small perturbations of electron concentration may be caused by electromagnetic radiation with wavelength less than red boundary of absorption in structure. In this paper we demonstrated that under conditions of such stimulating radiation and constant current density in heterostructure may develop the periodic process of electron concentration changes that leads to periodic pulses of voltage on structure's contacts.

Parameters of heterostructure, operating current density and wavelength of stimulating radiation can be select so that pulses will picosecond and they frequency will be in terahertz range.

References

1. I. A. Obukhov, "Relaxation Instability in Quantum Wire," *Proc. of 23rd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" – CriMiCo'2013*. (Sevastopol, Sept. 9–13, 2013), pp. 869–872, 2013. (In Russ.).
2. I. A. Obukhov, *Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices*, LAMBERT Academic Publishing, 2014.
3. I. A. Obukhov and E. A. Smirnova, "Nanowire as an Active Element of the Microwave Radiation Generators," *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, vol. 18, no 8, pp. 509–517, 2016. (In Russ.).
4. I. Obukhov, G. Gorokh, A. Lozovenko, and E. Smirnova, "Matrices of indium antimonide nanowires and their applications in microwave generators," *Nanoindustry Russia*, no. 6, pp. 96–108, 2017, doi: 10.22184/1993-8578.2017.77.6.96.108. (In Russ.).
5. I. A. Obukhov, "Multicomponent Model of Charge Transport in Quantum Semiconductor Devices," *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*, vol. 23, no. 1, pp. 24–31, Feb. 2021, doi: 10.17587/nmst.23.24-31. (In Russ.).
6. E. V. Demidov, V. M. Grabov, V. A. Komarov et al., "The Quantum Size Effect Specific Features of in the Transport Phenomena in Thin Bismuth Films on Mica Substrates," *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, vol. 53, no 6, pp. 736–740, 2019. (In Russ.).
7. V. A. Kasian et al., *Thin films of indium antimonide*, Chisinau: Chisinau State University, 1989. (In Russ.).
8. A. A. Andronov, A. A. Vitt, and S. E. Haikin, *Oscillation theory*, Moscow: Fizmatlit, 1959. (In Russ.).
9. I. A. Obukhov, "Generation of Noise by a Quantum Wire," *Proc. of 24th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" – CriMiCo'2014* (Sevastopol, Sept. 7–13, 2014), pp. 798–799, 2014. (In Russ.).
10. G. G. Gorokh, I. A. Obukhov, and A. A. Lozovenko, "Indium Antimonide Nanowire Arrays for Promising Thermoelectric Converters," *Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature*, no 1, pp. 3–12, 2015, doi: 10.15222/teka2015.1.03. (In Russ.).

Information about the authors

Nikolai N. Karushkin, head of department, Scientific Research Institute "Orion", Kiev, Ukraine.

Ilya A. Obukhov, technical director, Scientific-Industrial Company "Radiotekhnika", Moscow, Russian Federation.

УДК 004.031.6

Разработка и испытание комбинированной системы глобального мониторинга подвижных объектов

Пестряков А. В.

*Московский технический университет связи и информатики
улица Авиамоторная, 8а, г. Москва, 111024, Российская Федерация
pestryakov@mail.ru*

Получено: 2 июня 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В статье описывается комбинированная система глобального мониторинга подвижных объектов. Рассмотрены общие подходы к решению задачи слежения за подвижными объектами, находящимися в любой точке на поверхности Земли. Отмечаются недостатки и ограничения существующих систем и предлагаются пути их устранения за счет использования комбинированной системы, сочетающей глобальность спутниковых систем с преимуществами систем интернета вещей. Описываются вариант практической реализации комбинированной системы глобального мониторинга и результаты ее испытания в условиях реальной эксплуатации в различных регионах России.

Ключевые слова: системы спутникового мониторинга, радиобуй, интернет вещей, LoRaWAN, радиометка.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестряков А. В. Разработка и испытание комбинированной системы глобального мониторинга подвижных объектов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 185—195.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестряков, А. В. Разработка и испытание комбинированной системы глобального мониторинга подвижных объектов / А. В. Пестряков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 185—195.

1. Введение

В настоящее время широкое распространение получили системы спутникового мониторинга, предназначенные для сбора, обработки и

предоставления конечному пользователю информации, поступающей с радиометок, установленных на подвижных объектах, таких как: автомобили, корабли, метеорологические и экологические буи, дрейфующие льдины, сухопутные и морские млекопитающие и т. п. Однако многочисленные системы спутникового мониторинга, известные к настоящему времени, не всегда могут решать конкретные задачи исходя из технических или экономических ограничений. В данной работе рассмотрен вариант комбинированной (гибридной) системы спутникового мониторинга с применением технологии интернета вещей. Предлагаемая система свободна от многих недостатков, как первой, так и второй подсистем, лежащих в ее основе, что позволяет существенно расширить ее область применения или улучшить основные технические и экономические показатели.

2. Современное состояние и основные характеристики систем спутникового мониторинга

История развития таких систем насчитывает уже более 40 лет. Зарождение этой отрасли пришлось на начало 80 годов XX века. Были созданы системы «Argos», «Inmarsat» и «КОСПАС-SARSAT». Позднее создаются система спутниковой связи «Iridium» и отечественная система «Гонец», которые также используются для мониторинга [1—3].

Несмотря на бурное развитие этих систем, лишь немногие обеспечивают необходимое покрытие всей земной поверхности и требуемые эксплуатационные характеристики. Первое требование для систем мониторинга не так критично, как для систем спутниковой связи, и им можно пренебречь, если задержки в получении необходимой информации допустимы при решении конкретных задач. В тоже время, поскольку объем передаваемой информации в системах мониторинга существенно меньше (чаще всего это координаты объекта, его идентификатор, параметры окружающей среды и т. п.), протокол передачи может быть также существенно проще, чем в системах связи. При этом скорости передачи информации и полоса частот сигнала также значительно меньше. Это позволяет предельно упростить реализацию радиометки, уменьшить массу, габариты и потребляемую мощность и, соответственно, увеличить время ее работы от автономного источника питания.

Одной из наиболее популярных открытых (не аварийных) систем глобального сбора и позиционирования данных является система *Argos*, которая функционирует с 1978 г. [4—7]. Она базируется на спутниках серии *NOAA* (Национальное управление по исследованию океана и атмосферы, США) и дополняющих друг друга Глобальных центрах обработки данных, которые находятся во Франции, США и Австралии (рис. 1).

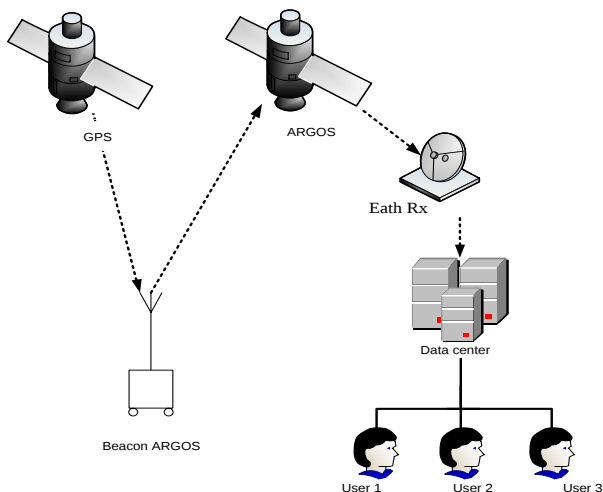


Рис. 1. Обобщенная структура системы Аргос.

Fig. 1. Generalized structure of the Argos system

В течение многих лет МТУСИ ведет исследования, разработку и производство сертифицированных радиометок системы Аргос (рис. 2) для решения задач мониторинга перемещения различных сухопутных и морских млекопитающих [8—10].

The screenshot shows the ARGOS website interface. At the top is the 'ARGOS' logo and a navigation bar with links: Services, Applications, System, Publications, Information, User Area. Below the logo is a breadcrumb trail: Argos > User area > Manufacturer list > Manufacturers. A sidebar on the left contains links: Welcome, Getting started, User's manual, Manufacturer list, User forms, Worldwide contacts, and Terms and conditions. The main content area is titled 'Manufacturers' and lists 'Certified manufacturers' and 'Integrators'. Below this, it states: 'The following icons indicate the type of applications being served:' followed by four icons: bird tracking (bird), terrestrial animal tracking (deer), marine animal tracking (fish), and ocean & climate studies (lighthouse). At the bottom, there is a section titled 'List of certified Argos transmitter manufacturers' with a dropdown menu set to 'Russia'. Below this is a table with two columns: 'Manufacturers' and 'Contacts'.

Manufacturers	Contacts
 MTUCI	N. N. Filimonov 8a, ul. Aviamotornaya 111024 Moscow Russia E-mail: nnn1955@yandex.ru Tel: +7 495 957 7704

Рис. 2. МТУСИ как сертифицированный производитель радиометок на сайте Аргос.

Fig. 2. MTUCI as a certified manufacturer of radio tags on the Argos website

Спутники системы *ARGOS* находятся на полярной орбите на высоте 850 км. Это требует достаточно большой мощности сигнала, излучаемого радиометкой, для обеспечения необходимой энергетики радиолинии. Ограниченный энергетический ресурс радиометок при их малых габаритах не позволяет обеспечить длительное время их работы от одного комплекта батарей, которые чаще всего невозможно поменять из-за особенностей условий эксплуатации. Кроме того, зона покрытия одного спутника — круг диаметром примерно 5000 км. Соответственно, период видимости радиометки для одного спутника составляет около 10 минут. Небольшое число таких спутников не позволяет обеспечить сплошное покрытие (особенно вблизи экватора), что приводит к перерывам передачи информации. Необходимо также отметить высокую стоимость радиометок (до нескольких тысяч евро), которые до сих пор изготавливаются лишь небольшими партиями для решения конкретных задач мониторинга.

3. Предлагаемая комбинированная система

Для устранения перечисленных выше негативных факторов предлагается использовать комбинированную (гибридную) систему глобального мониторинга в сочетании с технологией интернета вещей (*IoT*). В такой системе радиометки могут иметь существенно меньшую стоимость, массу, габариты и потребляемую мощность, обеспечивать сбор информации без перерывов практически с любой заданной дискретностью во времени, и при этом работать в любой местности, не требуя подключения к интернету (рис. 3).

Сеть радиометок системы *IoT* осуществляет сбор информации от объектов мониторинга и передачу ее на базовую станцию, где производится первичная обработка, объединение и подготовка пакета для передачи его на единственный радиобуй системы космического мониторинга (например, Аргос). Такая система позволяет при сравнительно небольшой стоимости осуществлять слежение за огромным количеством подвижных объектов в заданном районе (например, за стадами домашних или диких животных, передавая не только информацию об их координатах, но и такие важные параметры, как температуру тела и т. п., что важно для предотвращения развития заболеваний). Малые габариты и стоимость меток *IoT* позволяют проводить исследования поведения мелких млекопитающих, что было бы невозможно с использованием радиометок традиционных спутниковых систем.

Системы *IoT* активно применяются для решения самых разнообразных задач, и к настоящему времени известно уже несколько десятков стандартов таких систем [11]. По различным аспектам *IoT* работу ведет

большое число комитетов по стандартам Института инженеров по электронике и электротехнике (*IEEE*) и в рамках организаций по разработке стандартов *IoT* в Канаде, Китае, странах Европы, Индии, Японии, Республике Корея и США реализуются важные национальные проекты.

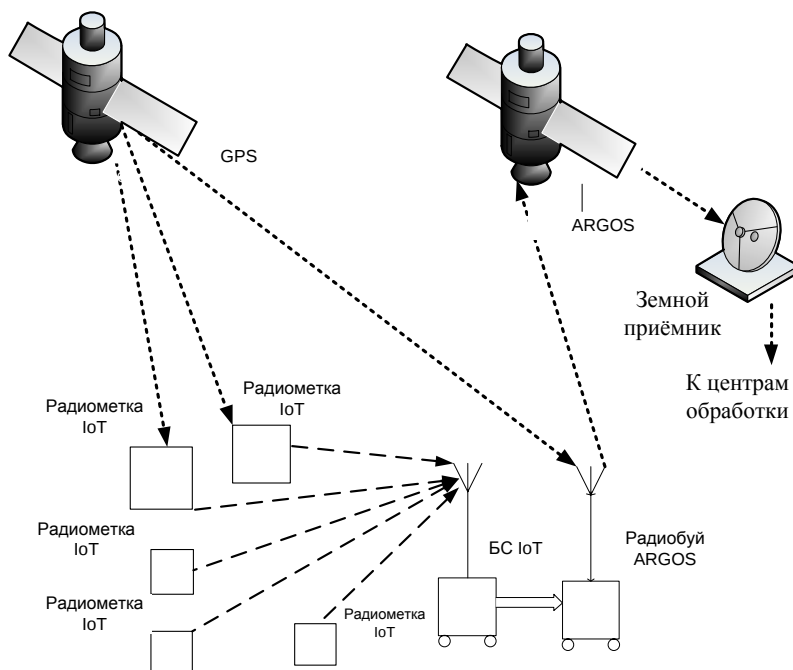


Рис. 3. Обобщенная структура комбинированной системы мониторинга.

Fig. 3. Generalized structure of the combined monitoring system

Варианты протоколов для реализации сетей интернета вещей из года в год меняются — одни успешно развиваются, другие постепенно исчезают, третьи возникают вновь. Поэтому стояла задача выбрать такой вариант, который обладает желаемыми свойствами, просуществует достаточно долго и разрешен для применения в России.

В качестве такого варианта была выбрана сетевая технология *LoRaWAN* [12].

В *LoRaWAN* используется частотный диапазон, разрешенный в России. *LoRaWAN* имеет хороший радиус действия при низком энергопотреблении. Скорость передачи невысокая, но достаточная для мониторинга животных (существенно выше реальных скоростей традиционных радиометок для животных). Данные достаточно хорошо защищены. Это открытый стандарт. Элементная база в свободной продаже, есть вся документа-

ция, и она доступна. Датчики, радиомодули и программное обеспечение этого стандарта только в России делают несколько компаний.

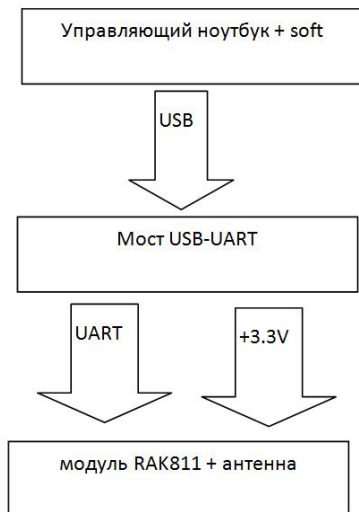
Беспроводная сеть *LoRaWAN* представляет собой совокупность базовых станций — шлюзов (*gateways*), пересылающих сообщения между оконечными устройствами (*end-devices*) и центральным сервером (*Network Server*), и характеризуется «звездной» топологией. Базовые станции (шлюзы) в традиционном варианте связываются с центральным сервером посредством стандартных *IP*-соединений. Связь между шлюзами и оконечными устройствами производится через беспроводные соединения, использующие широкополосную модуляцию *LoRa* [13].

4. Реализация комбинированной системы

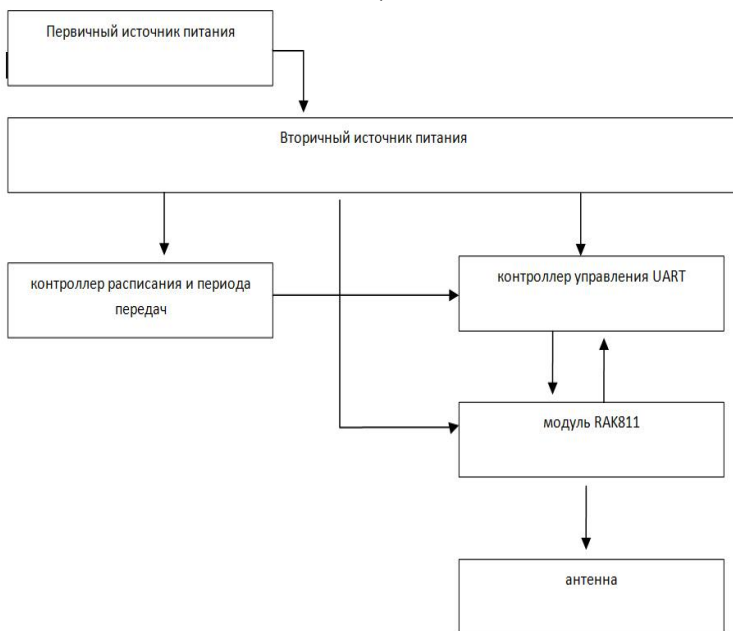
Для реализации макета гибридной системы мониторинга, которая не требует доступа к интернету и обладает достоинствами технологии *LoRa*, потребовалось найти такие модули *LoRa*, которые поддерживают связь «точка — точка», т. е. имеют возможность создания проприетарных протоколов связи в системе. Кроме того, эти модемы должны иметь невысокую цену. В результате были выбраны модули *RAK811* производства компании «*SHENZHEN RAKWIRELESS TECHNOLOGY*». Стоимость *RAK811* от производителя — 11 USD и меньше в зависимости от партии. Радиомодуль *RAK811* позволяет построить радиосеть типа «звезда» или реализовать простой обмен между двумя точками с минимумом инженерных затрат. Модуль включает в себя радиочастотный приемопередатчик *SX1276*, малопотребляющий микроконтроллер *STM32L151* и позволяет организовать передачу данных на несколько километров в условиях городской застройки. От других *LoRaWAN*-модулей *RAK811* отличается дополнительным маломощным усилителем, высокостабильным опорным генератором *TCXO* и полным экранированием всех электронных компонентов. Управление модулем производится при помощи простых *AT*-команд.

Основные параметры модуля *RAK811*: диапазон 868 МГц; модуляция *LoRa/FSK/GFSK/OOK*; возможность принимать сигнал на 20 дБ ниже уровня шума; чувствительность до −148 дБм; дальность связи до 15 км на открытом пространстве; регулируемая выходная мощность от 5 до 20 дБм; низкое потребление (500 нА) обеспечивает до 10 лет работы от батареи; настраиваемый интерфейс управления через *UART*; размеры 22×14×1.7 мм; рабочая температура −40...+85 °С.

Структурная схема макета радиометки *Lora* и базовой станции приведены на рисунке 4 (а и б соответственно).



а)



б)

Рис. 4. Структурная схема макета радиометки Lora и базовой станции.
 Fig. 4. Structural diagram of the layout of the Lora radio tag and the base station

В качестве программного обеспечения управляющего ноутбука была написана простейшая программа отправки/приема данных по мосту *USB-UART*.

Компоновка базовой станции и одного из вариантов радиометки приведены на рисунке 5 (а, б, в).

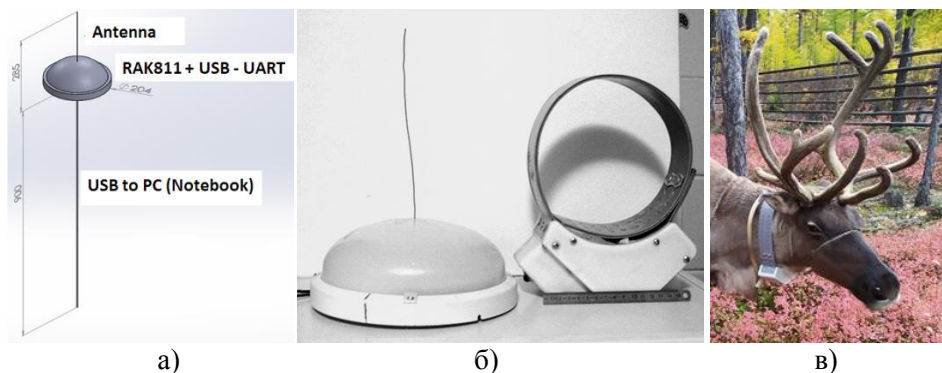


Рис. 5. Конструкция базовой станции и радиометки.

Fig. 5. The design of the base station and radio tag

5. Испытания комбинированной системы

Испытания макета системы мониторинга проводились с целью проверки работоспособности выбранной концепции и определения ее предельных характеристик.

Испытания в лабораторных условиях подтвердили все заявленные производителями показатели. Однако испытания в реальных условиях на местности (в Рязанской области и Якутии) выявили существенные отклонения от заявленных показателей по предельной дальности связи от меток *LoRa* до базовой станции.

Так, если в Рязанской области на открытой местности, когда базовая станция была расположена на высоте 10 метров, удавалось обеспечивать дальность связи до 9,5 км, то в Якутии в тайге она не превышала 2 км. Небольшая дальность действия системы в последнем случае объясняется небольшой высотой подъема передающей и приемной антенн (около 1,5 метров), а также экранирующим влиянием тайги.

6. Заключение

Созданная гибридная система глобального мониторинга обеспечивает выполнение возложенных на нее задач. Однако без эффективной антенны

радиометок и существенной высоты подъема антенны базовой станции зона обслуживания системы сравнительно невелика (практически никогда не достигает заявленной производителями RAK811 дальности связи до 15 км).

Список литературы

1. Ионов В. В., Пестряков А. В. Современное состояние систем космического мониторинга за подвижными объектами на территории России // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6, № 1. С. 24—27.
2. Ionov V. V., Pestryakov A. V. Research of Problems and Prospects of Development of Russian Space Monitoring Systems. В сб. : 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 — Conference Proceedings. 2021. С. 9488383.
3. Ionov V. V., Pestryakov A. V. Comparative Analysis of Subscriber Devices of Space Monitoring Systems. В сб.: 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. 2021. С. 9416027.
4. ARGOS Platform Transmitter Terminal (PTT) and ARGOS Platform Message Transceiver (PMT). General Specification. — ADII-SP-423-601-CNES. Iss. 1. Rev. 2. Sept. 12, 2003.
5. Argos/GPS Transmitter Functional Specifications for Fishing Vessel Monitoring. FVT 100 Model. — CLS.DO/NT/99.144. Vers. 2. Rev. 0. Toulouse, November 8, 2004.
6. Argos-3. The New Generation // Argos — Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite. 2008.
URL: http://www.argos-system.org/documents/publications/brochures/argos3_
7. Argos User's manual // Argos — Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite. 2008. URL: http://www.argos-system.org/documents/userarea/argos_manual_
8. Пестряков А. В., Козлов А. В. Реализация передающей платформы системы глобального сбора и позиционирования ARGOS // T-Comm : Телекоммуникации и транспорт. 2010. Т. 4, № 9. С. 30—32.
9. Козлов А. В., Пестряков А. В. Применение системы глобального сбора и позиционирования данных ARGOS для мониторинга морских млекопитающих // Радиотехника. 2010. № 4. С. 64—68.
10. Ionov V. V., Pestryakov A. V. Methods of Laboratory Testing of Radiometrics of Space Monitoring Systems for Mobile Objects. В сб. : 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2020. С. 9078540.
11. Dinges S. I., Pestryakov A. V. Development Trends of IoT Equipment. В сб. : 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 — Conference Proceedings. 2021. С. 9488391.
12. URL: <https://lora-alliance.org>
13. URL: <http://www.semtech.com>

Информация об авторе

Пестряков Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиооборудование и схемотехника» Московского технического университета связи и информатики, Российская Федерация.

Development and Testing of Combined Global Monitoring Systems for Moving Objects

A. V. Pestryakov

*Moscow Technical University of Communications and Informatics
8a, Aviamotornaya st., Moscow, 111024, Russian Federation
pestryakov@mail.ru*

Received: June 2, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The article describes a combined system for global monitoring of moving objects. General approaches to solving the problem of tracking moving objects located at any point on the Earth's surface are considered. The shortcomings and limitations of existing systems are noted and ways to eliminate them are proposed through the use of a combined system that combines the globality of satellite systems with the advantages of Internet of things systems. A variant of the practical implementation of the combined global monitoring system and the results of its testing in real operation conditions in various regions of Russia are described.*

Keywords: *satellite monitoring systems, radio beacon, internet of things, LoRaWAN, radio tag.*

For citation (IEEE): A. V. Pestryakov, "Development and Testing of Combined Global Monitoring Systems for Moving Objects," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 185–195, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.13. (In Russ.).

References

- [1] V. V. Ionov and A. V. Pestryakov, "Current Status of Space Monitoring Systems for Moving Objects on the Territory Of Russia," *Telecommunications and information technologies*, 2019, vol. 6, no. 1. pp. 24–27. (In Russ.).
- [2] V. V. Ionov and A. V. Pestryakov, "Research of Problems and Prospects of Development of Russian Space Monitoring Systems," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications – Conference Proceedings*, p. 9488383, 2021.
- [3] V. V. Ionov and A. V. Pestryakov, "comparative analysis of subscriber devices of space monitoring systems," *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings*, p. 9416027, 2021.
- [4] "ARGOS Platform Transmitter Terminal (PTT) and ARGOS Platform Message Transceiver (PMT). General Specification," ADII-SP-423-601-CNES, iss. 1, rev. 2. Sept. 12, 2003.
- [5] "Argos/GPS Transmitter Functional Specifications for Fishing Vessel Monitoring. FVT 100 Model, CLS.DO/NT/99.144," vers. 2, rev. 0. Toulouse: November 8, 2004.
- [6] "Argos-3. The New Generation," *Argos – Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite*, 2008.
URL: http://www.argos-system.org/documents/publications/brochures/argos3_

- [7] “Argos User’s manual,” *Argos – Worldwide tracking and environmental monitoring by satellite*, 2008. URL: http://www.argos-system.org/documents/userarea/argos_manual_
- [8] A. V. Pestryakov and A. V. Kozlov, “Implementation of the Transmission Platform of the Argos Global Collection and Positioning System,” *T-Comm: Telecommunications and transport*, vol. 4, no. 9, pp. 30–32, 2010. (In Russ.).
- [9] A. V. Kozlov and A. V. Pestryakov, “Application of the ARGOS Global Data Collection and Positioning System for Monitoring Marine Mammals,” *Radiotekhnika*, no. 4, pp. 64–68, 2010. (In Russ.).
- [10] V. V. Ionov and A. V. Pestryakov, “Methods of Laboratory Testing of Radiometrics of Space Monitoring Systems for Mobile Objects,” *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, p. 9078540, 2020.
- [11] S. I. Dinges and A. V. Pestryakov, “Development Trends of IOT Equipment,” *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYN-CHROINFO 2021 – Conference Proceedings*, p. 9488391, 2021.
- [12] URL: <https://lora-alliance.org>
- [13] URL: <http://www.semtech.com>

Information about the author

Alexander V. Pestryakov, Dr. Sci., Professor, Head of the Department of Radio Equipment and Circuit Engineering, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Russian Federation.

Искусственный интеллект в задачах планирования производства

¹Александров В. Р., ¹Баранов С. Е., ²Кузнецов М. И., ¹Мальгин С. А.,
²Обухов И. А., ¹Свердлова А. Д., ²Фатеев Д. А.

¹ Научно-производственное предприятие «Исток им. Шокина»
ул. Вокзальная, 2а, г. Фрязино, 141190, Российская Федерация
vraleksandrov@istokmw.ru

² Научно-производственное предприятие «Радиотехника»
5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, г. Москва, 115419, Российская Федерация
iao001@mail.ru

Получено: 18 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Представлены результаты применения методов искусственного интеллекта к задачам планирования производства электронных компонентов и устройств в условиях неполноты нормативной базы. Продемонстрирована возможность оптимизации планов и поэтапного пополнения производственных нормативов. Показано, что взаимодействие интеллектуальной системы планирования с автоматизированной системой мониторинга работы оборудования позволяет выявить проблемные зоны в управлении производством.

Ключевые слова: производство, искусственный интеллект, планирование, объекты планирования, графы, промышленный интернет вещей, нейронная сеть, оптимизация.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Искусственный интеллект в задачах планирования производства / В. Р. Александров [и др.] // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 196—208.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Искусственный интеллект в задачах планирования производства / В. Р. Александров, С. Е. Баранов, М. И. Кузнецов [и др.] // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 196—208.

1. Введение

Стандартный цикл управления современным предприятием, показанный на рис. 1, поддерживается различными средствами автоматизации,

использующими специальные вычислительные процедуры. Как правило, они интегрированы в единую автоматизированную систему управления, основанную на стандартизованных процессах и обеспечивающую единство и целостность используемых данных. Примерами такого подхода являются различные *ERP*-системы [1—3], широко применяемые в промышленности.

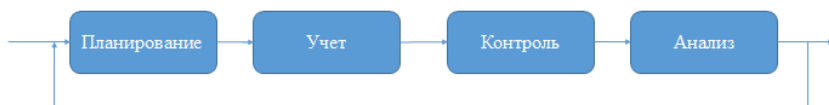


Рис. 1. Цикл управления.

Fig. 1. Loop control

Важнейшими вычислительными процедурами являются расчет потребности в материалах и расчет потребности в производственных мощностях.

Эти классические методы эффективны, если ассортимент продукции предприятия не меняется или меняется медленно и обеспечен гарантированным спросом. Для применения расчетных процедур необходимо наличие максимально полной нормативной базы предприятия, включая нормативы складского хранения, нормативные сроки и объемы поставок, производственные и финансовые нормативы.

Если эти условия не выполнены, или выполнены частично, то нужно искать дополнительные пути повышения эффективности управления. Один из них — совместное использование классических расчетных процедур и вычислительных методов искусственного интеллекта (далее ИИ).

2. Укрупненные объекты планирования

Общими проблемами большинства отечественных предприятий, производящих электронику, являются недостаточно детализированные временные пооперационные нормы или их частичное, а иногда и полное отсутствие. Это затрудняет, а часто делает невозможным, применение для планирования классических расчетных алгоритмов. При этом из опыта с определенной точностью известны времена производства отдельных блоков и узлов изделий.

Выделение таких блоков и узлов в укрупненные объекты планирования позволяет достаточно точно и оптимально планировать производство в условиях неполной нормативной базы. Технологически укрупненные объекты планирования представляют собой цепочки последовательных операций до первой точки сборки. Источниками данных для автома-

тического формирования объектов являются иерархический состав изделия (дерево изделия) и технологические карты его изготовления. Используется аппарат теории графов.

Дерево изделия формируется сверху-вниз, реализуя процесс разделения изделия на детали, компоненты и необходимые материалы. Производственный процесс, описываемый технологическими картами, формируется в обратном направлении — снизу-вверх, реализуя процессы изготовления компонентов и соединения их в детали и изделие. На рис. 2 приведена визуализация дерева изделия А, содержащего 4493 записи. Граф изделия формируется как ориентированный граф от узла «номер записи» к узлу «номер материнской записи».

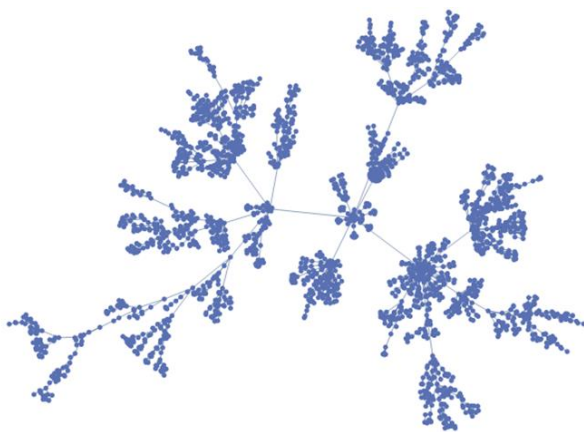


Рис. 2. Визуализация дерева изделия А.

Fig. 2. Visualization of the product tree A

Если в графе изделия выделить все оконечные вершины и вершины, смежные с оконечными и имеющие только один вход и один выход, то получатся первичные объекты, которые необходимо первоначально создать при производстве изделия. На рис. 3 приведены все такие первичные объекты для изделия А. Красными точками обозначен этап сборки, для выполнения которого необходимы все составные компоненты первичных объектов.

Первичные объекты являются первой группой объектов планирования, так как без них не может корректно продолжаться процесс производства изделия. Формирование первой группы объектов планирования сразу же подсказывает достаточно простое решение задачи уменьшения материальных затрат на производство: группировка деталей и сборочных единиц в партии.

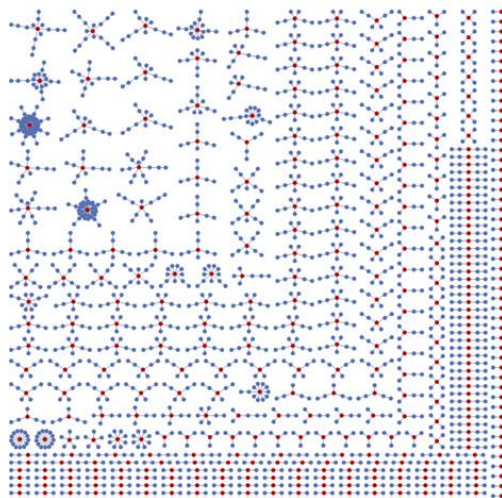


Рис. 3. Визуализация первичных объектов изделия А.

Fig. 3. Visualization of the primary objects of product A

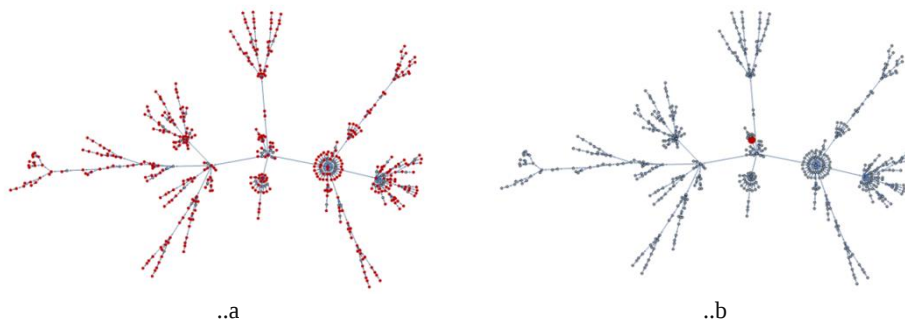


Рис. 4. Граф сборки изделия А: а — с указанием этапа сборки;
b — с выделением конечной точки сборки изделия.

Fig. 4. Graph of the assembly of the product A: a – indicating the stage of assembly;
b – with the selection of the end point of the assembly of the product

Если из графа изделия удалить все первичные объекты, то получим более обозримый граф сборки, показанный на рис. 4а. Красными точками на графе сборки обозначены вершины, соответствующие первичным объектам, так же обозначенные красными точками на рис. 3.

Конечная вершина, реализующая факт создания изделия, обозначена большим красным кругом на графе сборки рис. 4b. Граф сборки определяет вторую группу объектов планирования, связанных с распараллеливанием работ. Именно их целесообразно использовать в качестве укрупненных

объектов планирования. В результате перехода к таким объектам описание изделия в технологической карте, состоящее из пяти—восми тысяч записей, преобразуется в сорок—девяносто объектов планирования и графа итоговой сборки, на который приходится 5—7 % общей трудоемкости изделия.

Использование описанных процедур позволяет перейти к решению двух оптимизационных задач:

- уменьшение материальных затрат за счет группировки деталей и сборочных единиц в партии;
- увеличение производительности за счет сокращения простоев и переналадок оборудования.

Однако при отсутствии информации о временах формирования объектов планирования решения этих задач возможно только в терминах оптимальных партий и оптимального количества переналадок, не привязанных к срокам исполнения работ. Требуемые времена могут быть получены при анализе данных, предоставляемых системой мониторинга работы производственного оборудования.

3. Система мониторинга работы оборудования — промышленный Интернет вещей

На предприятии АО «НПП “Исток” им. Шокина» разработана, внедрена и функционирует собственная платформа промышленного Интернета вещей (*Industrial Internet of Things*) *IIoT.Istok*, решающая задачи мониторинга функционирования оборудования и предиктивной аналитики [4, 5, 6]. В основу платформы положено коммерческое решение *Winnun*¹. Разработка платформы *IIoT.Istok* велась при финансовой поддержке Минпромторга России в рамках комплексного проекта «Цифровое производство».

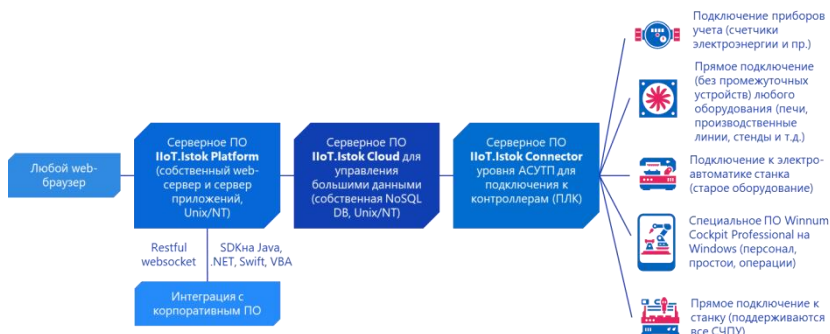


Рис. 5. Технология реализации платформы *IIoT.Istok*.

Fig. 5. Implementation technology of the *IIoT.Istok* platform

¹ Электронный ресурс: <https://winnun.io/>

Технология реализации платформы показана на рис. 5. Платформа содержит полный набор инструментов для удаленного мониторинга, диагностики и оптимизации работы технологического, инженерного и стандового оборудования.

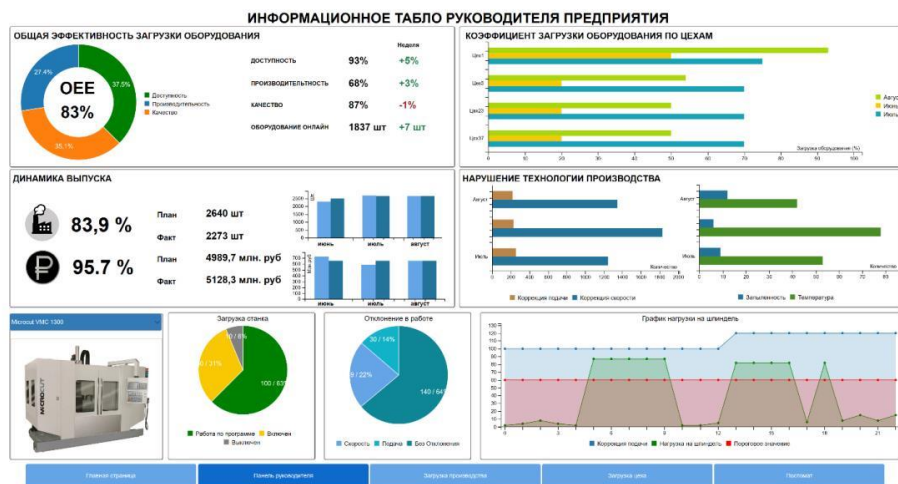


Рис. 6. Информационное табло руководителя предприятия.

Fig. 6. Information board of the head of the enterprise

Платформа формирует общий (см. рис. 6) и детальный фактический отчеты (см. рис. 7) о работе оборудования, как в режиме реального времени, так и за любой период мониторинга, включая смену, указывает причины остановок.

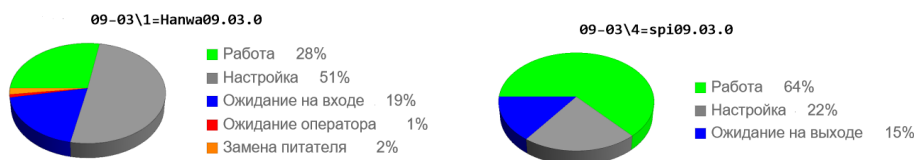


Рис. 7. Примеры анализа и визуализации данных о функционировании оборудования для производства электросчетчиков.

Fig. 7. Examples of analysis and visualization of data on the operation of equipment for the production of electricity meters

Автоматизированный анализ этих данных позволяют вычислить средние за некоторый период «грубые показатели», такие как время переналадки оборудования и время простоя по другим причинам. Для вычисления средних времен производственных операций, то есть производственных нормативов, необходима дополнительная информация, описы-

вающая процесс производства. Она, к сожалению, далеко не всегда присутствует в маршрутных картах. Однако и «грубые показатели» могут быть с успехом использованы для оптимизации планов производства.

4. Пример оптимизации плана производства

Процедуру оптимизации плана производства на основе методов искусственного интеллекта продемонстрируем на примере электросчетчиков. Исходный план первого квартала 2022 г. предполагал выпуск двадцати шести наименований продукции (итоговых изделий) в заданных количествах. Все необходимые материалы и комплектующие имелись, что серьезно упрощало задачу планирования.

Анализ составов изделий и маршрутных карт их производства показал, что обобщенными объектами планирования являются итоговые изделия. На рис. 8 показана связность изделий и составляющих их компонентов. Изделия имеют двузначную, а компоненты — трехзначную нумерацию. С математической точки зрения задача дискретной оптимизации в пространстве представленных на рис. 8 параметров относится к классу нерешаемых за разумное время.

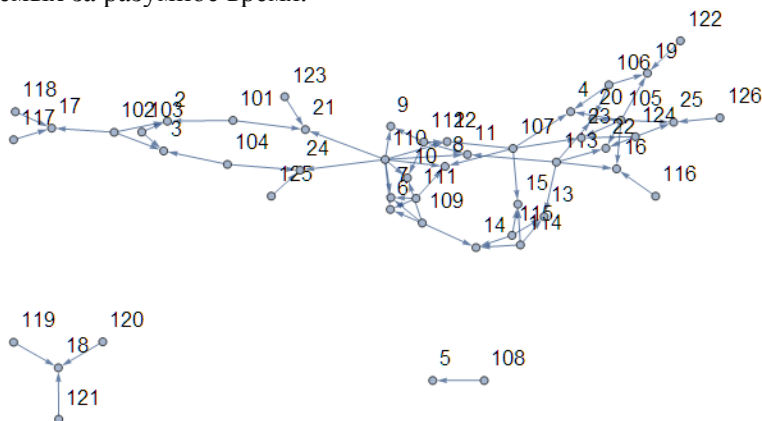


Рис. 8. Связность изделий и компонент.

Fig. 8. Connectivity of products and components

Применение кластеризации при помощи нейронной сети со структурой, показанной на рис. 9, позволяет упростить задачу и сделать ее решаемой за разумное время. Как видно на рис. 10, только четыре компонента с номерами 107, 109, 110 и 113 определяют связность изделий. «Выкалывание» этих четырех компонентов позволяет разбить изделия на условно-независимые группы, показанные на рис. 11. В этих группах так же можно

выделить компоненты, определяющие связность группы. Таким образом, сложность исходной задачи уменьшается многократно.

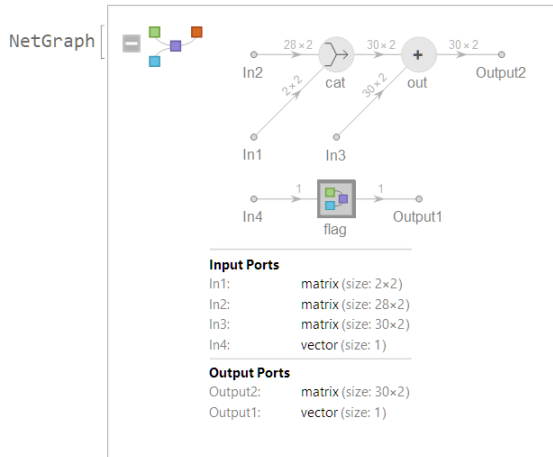


Рис. 9. Структура нейронной сети, используемой для планирования.

Fig. 9. The structure of the neural network used for planning

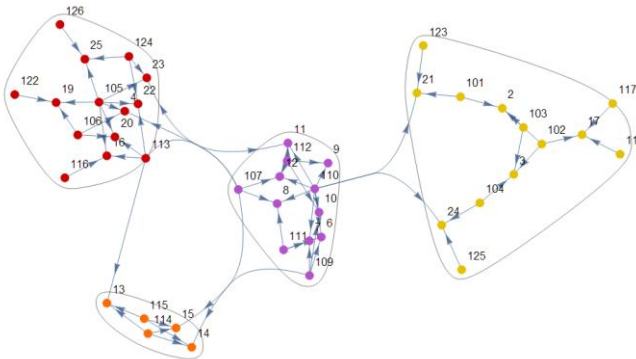


Рис. 10. Выделение кластеров.

Fig. 10. Selection of clusters

Из анализа данных мониторинга (см. рис. 7) следует, что наиболее значимым фактором, уменьшающим время работы оборудования, является время настройки. Начальный квартальный план производства содержал пятьдесят шесть перенастроек.

Из анализа данных состава изделий (см. рис. 10 и 11) следует, что минимизировать количество настроек оборудования можно за счет производства сначала компонентов 107, 109, 110 и 113, определяющих связность изделий, и последующего изготовления изделий в любой последова-

тельности при условии, что все входящие в текущее изделие компоненты изготавливаются в объеме всей программы работ. Такой «первоначально оптимальный» план гарантирует минимальное количество переналадок конвейера, которое точно равняется общему количеству изготавливаемых различных итоговых изделий программы работ, т. е. двадцати шести в рассматриваемом случае.

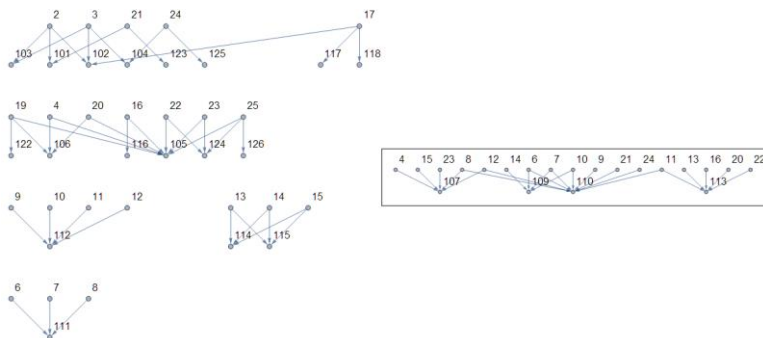


Рис. 11. Условно независимые группы изделий.

Fig. 11. Conditionally independent product groups

Если имеются дополнительные требования к срокам и очередности выпуска отдельных итоговых изделий, то их можно учесть, применяя ту же нейронную сеть, что использовалась при кластеризации. Она переставляет единицы планирования в требуемые позиции и пересчитывает план в виде последовательности операций. Такая перестановка увеличивает необходимое количество переналадок конвейера, но при этом обеспечивает требуемые условия по срокам изготовления изделий. Перебор возможных вариантов показывает, что оптимизация позволяет сократить время выполнения рассматриваемой квартальной программы на 5—12 рабочих дней.

5. Заключение

В ОА «НПП «Исток» им. Шокина» внедрен и находится в опытной эксплуатации программный модуль оптимизации плана производства на основе искусственного интеллекта. Он интегрирован с подсистемами планирования производства, технологии, мониторинга технологического, инженерного и стенового оборудования, входящими в состав программного продукта «Цифровое производство», созданного и функционирующего на предприятии. Реализованные в настоящее время возможности модуля представлены в данной работе.

Основой модуля являются методы и алгоритмы теории графов и специализированная нейронная сеть, решающая задачи анализа данных и

оптимизации маршрутов в условиях внешних ограничений, в частности, производственно-коммерческого характера.

Представленные результаты являются первыми шагами на пути реализации более общей программы применения методов искусственного интеллекта к задачам производственного планирования. Она подразумевает формирование дерева всех возможных вариантов состояний (производственных цепочек), которые обучаются на множестве вариантов производственных параметров (доступность материалов и комплектующих, готовность оборудования и др.). В результате машинного обучения должна появиться нейронная сеть, представляющая собой «расчетную таблицу», которая позволит сопоставить конкретную текущую ситуацию ранее просчитанным вариантам из дерева всех состояний.

Наличие такого инструмента позволит многократно ускорить процедуры планирования, сделать их гибкими и адаптивными к быстро меняющимся внешним условиям. Все это в конечном итоге должно привести к существенному росту эффективности деятельности предприятия.

Благодарности

Авторы благодарны Минпромторгу России за предоставленную субсидию на выполнение работ.

Список литературы

1. Гайфуллин Б. Н., Обухов И. А. Автоматизация систем управления предприятиями стандарта ERP/MRP II. Москва : Богородский печатник ; Интерфейс-Пресс, 2000. 104 с.
2. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II. С.-Петербург : Питер, 2008. 416 с.
3. Питеркин С. В., Оладов Н. А., Исаев Д. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем. Москва : Альпина Паблишерз, 2010. 368 с.
4. Machinery health prognostics: a systematic review from data acquisition to RUL prediction / Y. Lei [et al.] // Mech. Syst. Signal Process. 2018. Vol. 104. P. 799—834.
5. Чикало О. В., Александров В. Р., Обухов И. А. Система раннего обнаружения проблемного телекоммуникационного оборудования. В сб. : 30-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, 6—12 сент. 2020 г.). 2020. С. 128—129.
6. Александров В. Р., Баранов С. Е., Обухов И. А. Промышленный интернет вещей для предприятий радиоэлектронной промышленности // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 191—199.

Информация об авторах

Александров Виталий Романович, директор по цифровой трансформации АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Баранов Сергей Евгеньевич, начальник отдела АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Кузнецов Михаил Иванович, начальник отдела АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Мальгин Сергей Анатольевич, начальник сектора АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Обухов Илья Андреевич, технический директор АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Свердлова Алёна Дмитриевна, начальник сектора АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Фатеев Дмитрий Александрович, начальник отдела АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Artificial Intelligence in the Tasks of Manufacturing Planning

V. R. Alexandrov¹, S. E. Baranov¹, M. I. Kuznetsov², S. A. Malgin¹,
I. A. Obukhov², A. D. Sverdlova¹, D. A. Fateev²

¹ Research and production enterprise “Istok” n. a. Shokin
2a, Vokzalnaya st., Fryazino, 141190, Russian Federation
vrleksandrov@istokmw.ru

² Research and production enterprise “Radiotekhnika”
15, build. 11, 5th Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation
iao001@mail.ru

Received: May 18, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Results of applying the methods of Artificial Intelligence to the tasks of planning the production of electronic components and devices under conditions of incomplete normative base are presented. The possibility of optimization plans and gradually replenish production standards is demonstrated. It has been shown that the interaction of the intelligent planning system with the automated system for monitoring the operation of equipment makes it possible to identify problem areas in manufacturing management.

Keywords: manufacturing, Artificial Intelligence, planning, planning objects, graphs, Industrial Internet of Things, neural network, optimization.

For citation (IEEE): V. R. Alexandrov [et al.], “Artificial Intelligence in the Tasks of Manufacturing Planning,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 196–208, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.14. (In Russ.).

Acknowledgements

The authors are grateful to the Ministry of Industry and Trade of Russia for the grant provided for the work.

References

- [1] B. N. Gaifullin and I. A. Obukhov, *Automation of enterprise management systems of the ERP/MRP II standard*. Moscow: Bogorodsky pechatnik; Interface-Press, 2000. (In Russ.).
- [2] D. A. Gavrilov, *Production management based on the MRP II standard*. St. Petersburg: Piter, 2008. (In Russ.).
- [3] S. V. Peterkin, N. A. Oladov, and D. V. Isaev, *Just in time for Russia. The practice of using ERP-systems*. Moscow: Alpina Publishers, 2010. (In Russ.).
- [4] Y. Lei, N. Li, L. Guo, N. Li, T. Yan, and J. Lin, “Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 104, pp. 799–834, May 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.11.016.

- [5] O. V. Chikalo, V. R. Aleksandrov, and I. A. Obukhov, “Early detection system for problematic telecommunication equipment,” *30th Intern. Crimean Conf. “Microwave and telecommunication technology” — CriMiCo ’2020* (Sevastopol, September 6–12, 2020), pp. 128–129, 2020. (In Russ.).
- [6] V. R. Alexandrov, S. E. Baranov, and I. A. Obukhov, “Industrial Internet of Things for Electronic Industry Enterprises,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 209–217, 2022. (In Russ.).

Information about the authors

Vitaly R. Aleksandrov, Director for Digital Transformation of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Sergey E. Baranov, Head of the Department of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Mikhail I. Kuznetsov, Head of Department of JSC NPP JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

Sergey A. Malgin, head of the sector of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Ilya A. Obukhov, Technical Director of JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

Alyona D. Sverdlova, head of the sector of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Dmitry A. Fateev, Head of Department of JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

Промышленный интернет вещей для предприятий радиоэлектронной промышленности

¹Александров В. Р., ¹Баранов С. Е., ²Обухов И. А.

¹ Научно-производственное предприятие «Исток им. Шокина»
ул. Вокзальная, 2 а, г. Фрязино, 141190, Российская Федерация
sebaranov@istokmw.ru

² Научно-производственное предприятие «Радиотехника»
5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, г. Москва, 115419, Российская Федерация
iao001@mail.ru

Получено: 31 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Описана платформа промышленного интернета вещей, ориентированная на решение задач, актуальных для управления предприятиями радиоэлектронной промышленности. Показано, что применение современного инструментария, основанного на интеллектуальном анализе больших массивов данных, позволяет обеспечить руководителей достоверной оперативной информацией для принятия управленческих решений.

Ключевые слова: интернет вещей, большие данные, интеллектуальный анализ данных, предиктивная аналитика, радиоэлектронная промышленность.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Александров В. Р., Баранов С. Е., Обухов И. А. Промышленный интернет вещей для предприятий радиоэлектронной промышленности // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 209—217.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Александров, В. Р. Промышленный интернет вещей для предприятий радиоэлектронной промышленности / В. Р. Александров, С. Е. Баранов, И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 209—217.

1. Введение

Современный индустриальный мир все больше погружается в промышленный интернет вещей (*Industrial Internet of Things*, сокращенно — *IIoT*), в системы объединенных компьютерных сетей с подключенным к

ним технологическим, инженерным и стендовым оборудованием со встроенными датчиками и программным обеспечением для сбора и обмена данными, с возможностью удаленного контроля и управления в автоматизированном или автоматическом режимах.

Применение интернета вещей в промышленности создает новые возможности для развития производства и решения ряда важных задач: повышения производительности оборудования, снижения материалоемкости и энергоемкости производимой продукции, повышения ее качества, оптимизации и улучшения условий труда сотрудников, роста рентабельности производства.

Особенно актуальными эти возможности являются для радиоэлектронной промышленности — самой быстрорастущей отрасли промышленности в мире. За последние 30 лет среднегодовой темп роста мировой радиоэлектроники составил около 8 %.

Классические методы контроля на большом современном предприятии радиоэлектроники, использующем обширную производственную кооперацию, уже не позволяют комплексно и оперативно определять общую эффективность работы оборудования, объективно идентифицировать причины его простоя и техническое состояние. В результате повышается выход брака и снижается общая эффективность производства. Отсутствие оперативной аналитики о свободных мощностях предприятия не позволяют своевременно реагировать на потребности развивающегося рынка, что в свою очередь приносит убытки и снижает конкурентоспособность предприятия.

Желание преодолеть эти проблемы является стимулом для применения *IIoT* в производстве. Промышленный интернет вещей позволяет оперативно, в режиме реального времени, получить информацию по всему оборудованию на предприятии и рассчитать коэффициент его полезного использования. Применение на получаемом массиве данных предиктивной аналитики [1, 2] и нейронных сетей [3] позволяет построить график планово-предупредительных ремонтов и загрузки оборудования.

2. Платформа промышленного интернета вещей

В НПП «Исток им. Шокина» платформа *IIoT* строилась на основе коммерческого решения *Winnum*¹, включенного в реестр российских программ для ЭВМ и баз данных Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Отбор производился из продуктов нескольких компаний, сравниваемых более чем по ста параметрам.

¹ Электронный ресурс: <https://winnum.io/>

Выбранное программное обеспечение оказалось максимально пригодным для решения задач предприятия. Оно содержит готовые решения для мониторинга производственного оборудования, контроля активов на основе *RFID/BLE* и контроля технологических процессов. Поддерживается возможность самостоятельного добавления сигналов оборудования на основе документации и встроенный *SDK*, позволяющий самостоятельно разрабатывать пользовательские приложения. Важным элементом *Winnum* является собственная система управления большими данными.

Построение платформы *IIoT* предприятия было начато с пилотного проекта в металлообработке. Было задействовано 9 обрабатывающих центров — металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением. Были достигнуты следующие результаты:

- простой станка (бездействие оператора после 5 минут статуса «Станок остановлен») — снижен на 1,7 %;
- состояние «Станок остановлен» (смена заготовки, ввод корректора на инструмент, отсутствие смены статуса на станке в течении более чем десяти минут после остановки управляющей программы - обслуживание оператором до 3 станков) — снижено на 1,9 %;
- состояние «Станок выключен» (дефицит штата операторов, норма обслуживания превышает 2 станка на 1 оператора) — снижено на 6,7 %;
- состояние «Нет управляющей программы» (отсутствует управляющая программа для работы) — снижено на 0,8 %;
- выход оборудования из строя (поломка станка, вызов группы механика для ремонта) — снижен на 5,8 %;
- состояние «Нет заготовок» (отсутствуют на рабочем месте заготовки для продолжения работы) — исключено полностью;
- состояние «Отсутствует технологическая/конструкторская документация» (отсутствие на рабочем месте чертежа, 3D-модели, маршрутной карты) — исключено полностью.

В совокупности при масштабировании на всю металлообработку предприятия полученные в пилотном проекте результаты уже дали ощутимый экономический эффект. Однако сложность технологических процессов производства радиоэлектроники выдвигает новые требования к системе мониторинга оборудования: система должна уметь обеспечивать мониторинг не только технологического, но и инженерного, среднего оборудования и вспомогательных систем, участвующих в производственном цикле, а также выявлять зависимости в их работе. Должны формироваться массивы данных для разных категорий сотрудников: механик, технолог, директор производства, генеральный директор и т. д. Эту задачу решает единый ситуационный центр (см. рис. 1).



Рис. 1. Ситуационный центр мониторинга оборудования.

Fig. 1. Situational equipment monitoring center

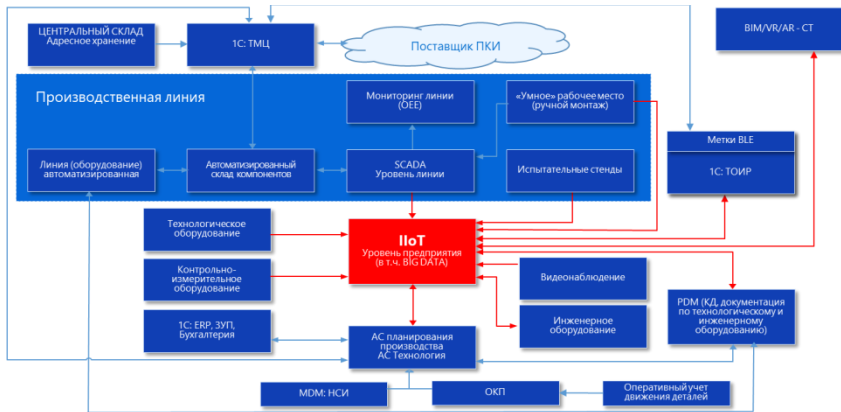


Рис. 2. ИТ-ландшафт IIoT предприятия.

Fig. 2. IT landscape IIoT enterprise

Для анализа связей платформы интернета вещей с информационными системами предприятия, была разработана схема ИТ-ландшафта *IIoT* (см. рис. 2). Видно, что *IIoT* тесно пересекается почти со всеми информационными системами, поддерживающими производство изделий, порождая новые интеграционные связи. Это и оборудование, вспомогательные системы, существующие *SCADA*, системы технологической подготовки производства, системы оперативно-календарного планирования и т. д. Конфигурация действующей *IIoT* предприятия показана на рис. 3.

Сегодня *IIoT.ISTOK* — это передовая российская платформа для промышленного интернета вещей, которая содержит полный набор инструментов для удаленного мониторинга, диагностики и оптимизации работы техно-

логического, инженерного и стендового оборудования, изделий и процессов их эксплуатации с интегрированной системой защиты ИТ-инфраструктуры.

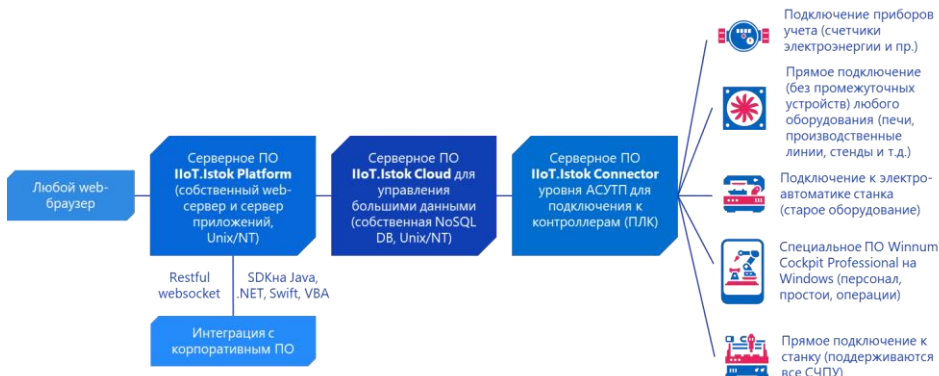


Рис. 3. Архитектура платформы интернета вещей предприятия.

Fig. 3. Enterprise IoT Platform Architecture

Встроенная *Big Data*, *SDK* и различные методы интеграции платформы *IIoT.Istok* с существующими информационными системами предприятия позволяют строить более глубокую аналитику, основанную, например, на количестве сотрудников в смену, количествах вмешательств в технологию, трендах выпуска годной продукции, скорости поставок ТМЦ, графике планово-предупредительных ремонтов, номенклатуре применяемых материалов при производстве, контроле ручных операций и т. д. Все эти данные формируют «цифровую тень» изделия, что дает возможность быстрее реагировать на рекламации и повышать качество выпускаемой продукции.

Гибкость платформы за счет встроенных базовых элементов позволяет ей найти свое место на различных этапах производственного цикла и обеспечения деятельности предприятия, а именно:

— мониторинг и диспетчеризация производственного, технологического и инженерного оборудования:

- ✓ мониторинг нагрузки, технологии, действий персонала, диагностика;
- ✓ прямое подключение к системам управления;
- ✓ поддержка всех систем с числовым программным управлением;
- ✓ неограниченное количество сигналов, как правило, 150—300 на единицу оборудования;
- ✓ специализированное ПО и планшет для ввода ручных состояний (простои, операции, персонал);
- ✓ вывод аналитической информации на информационное табло (дашборды);

- контроль перемещения транспорта:
 - ✓ прием заявок водителем;
 - ✓ контроль выполнения заявок;
 - ✓ поддержка всех основных трекеров;
- контроль производственной среды и технологии:
 - ✓ наглядная динамическая 2D- и 3D-визуализация;
 - ✓ электронные журналы и протоколы;
 - ✓ работа со стационарным и переносным оборудованием;
- контроль местоположения с технологией *RFID (BLE, LoRaWan, GSM-маяки и т. д.)*:
 - ✓ поиск и анализ местоположения и длительности пребывания;
 - ✓ контроль комплектации и прохождения точек ОТК;
 - ✓ маркировка продукции для последующей идентификации;
 - ✓ автоматическая идентификация объектов с помощью радиосигналов;
- мониторинг окружающей среды:
 - ✓ накопление и анализ показаний различных датчиков и контролеров;
 - ✓ вывод данных на информационное табло;
 - ✓ установка правил, действующих при выходе показателей за допустимые пределы;
- поддержка модели «умный город»:
 - ✓ объединение в единую систему всех систем мониторинга предприятия;
 - ✓ подключение ко всем имеющимся IP-камерам;
 - ✓ подключение к системам электроснабжения с оперативным оповещением о чрезвычайных ситуациях на мобильные устройства;
 - ✓ мониторинг и диагностика состояния сигналов светофоров;
 - ✓ мониторинг и диагностика состояния транспорта.

3. Заключение

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработана, внедрена и функционирует собственная платформа промышленного Интернета вещей PoT.Istok, решающая задачи мониторинга различного оборудования и анализа больших массивов данных. Платформа входит в состав программного продукта «Цифровое производство», созданного на предприятии. Некоторые из реализованных в настоящее время возможностей платформы описаны в данной работе.

Применение *IIoT.Istok* позволяет в режиме реального времени получать достоверные данные от многочисленных и разнородных источников. Анализ этих данных формирует объективную картину текущего состояния предприятия и прогноз ее развития с любой степенью детализации, начиная от технического состояния единицы оборудования и заканчивая объемом выпуска продукции.

Благодарности

Авторы благодарны Минпромторгу России за предоставленную субсидию на выполнение работ.

Список литературы

1. Machinery health prognostics : a systematic review from data acquisition to RUL prediction / Y. Lei, N. Li, L. Guo [et al.] //Mech. Syst. Signal Process. 2018. Vol. 104. P. 799—834.
2. Чикало О. В., Александров В. Р., Обухов И. А. Система раннего обнаружения проблемного телекоммуникационного оборудования. В сб. : 30-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, 6—12 сент. 2020 г.). 2020. С. 128—129.
3. Назаров А. В., Лоскутов А. И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. СПб. : Наука и Техника, 2003. 384 с.

Информация об авторах

Александров Виталий Романович, директор по цифровой трансформации НПП «Исток им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Российская Федерация.

Баранов Сергей Евгеньевич, начальник отдела НПП «Исток им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Российская Федерация.

Обухов Илья Андреевич, технический директор НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Industrial Internet of Things for Electronic Industry Enterprises

V. R. Alexandrov¹, S. E. Baranov¹, and I. A. Obukhov²

¹ *Research and Production Corporation “Istok”*
2a Vokzalnaia st., Fryazino, Moscow region, 141190, Russian Federation
vraleksandrov@istokmw.ru

² *Scientific-Industrial Company “Radiotekhnika”*
15, build 11, 5th Donskoi proyezd, Moscow, 115419, Russian Federation
iao001@mail.ru

Received: May 31, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: The industrial Internet of Things platform is described. It is focused on solving the problems that are relevant for the management of the electronic industry. It has been shown that the use of modern tools based on intelligent analysis of Big Data makes it possible to provide managers with reliable operational information for management decisions.

Keywords: Internet of Things, Big Data, intelligent analysis of data, predictive analysis, electronic industry.

For citation (IEEE): V. R. Alexandrov, S. E. Baranov, and I. A. Obukhov, “Industrial Internet of Things for Electronic Industry Enterprises,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 209–217, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.15. (In Russ.).

Acknowledgment

The authors are grateful to the Ministry of Industry and Trade of Russia for the grant provided for the work.

References

- [1] Y. Lei, N. Li, L. Guo, N. Li, T. Yan, and J. Lin, “Machinery health prognostics: a systematic review from data acquisition to RUL prediction,” *Mech. Syst. Signal Process*, vol. 104, pp. 799–834, 2018.
- [2] O. V. Chikalo, V. R. Alexandrov, and I. A. Obukhov, “System for early detection of problematic telecommunication equipment,” 30th Intern. Crimean Conf. “Microwave and telecommunication technology” – CriMiCo ’2020 (Sevastopol, September 6–12, 2020), pp. 128–129, 2020. (In Russ.).
- [3] A. V. Nazarov and A. I. Loskutov, *Neural network algorithms for forecasting and optimizing systems*, Saint Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2003. (In Russ.).

Information about the authors

Vitaly R. Alexandrov, Director of Digital Transformation, Research and Production Corporation “Istok”, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Sergey E. Baranov, Head of the Department of Research and Production Corporation “Istok”, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Ilya A. Obukhov, Technical Director of Scientific-Industrial Company “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.373, 621.311.001.57, 004.451.23

Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы

Новиков С. С., Костерова В. С.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
просп. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Российская Федерация
nss@sibmail.com, vsk727@yandex.ru*

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Работа посвящена исследованию динамической неустойчивости когерентных режимов системы двух автогенераторов с сильной взаимной резонансной связью. Показано, что данная система может генерировать синхронные колебания на трех различных частотах, которые соответствуют базовым типам колебаний — модам: одной синфазной и двум противофазным. Проведен качественный анализ влияния характеристик резонансной связи на устойчивость собственных синхронных типов колебаний. Сформулирован аналитический критерий неустойчивости синфазных колебаний и условия его выполнения. Обсуждается возможность подавления устойчивости противофазных колебаний. Методом численного моделирования исследованы временные и спектральные характеристики колебательных процессов в различных режимах, включая хаотический. Продемонстрированы варианты поведения системы при конкуренции и подавлении мод, сопровождаемые автомодуляционными процессами. Обсуждаются особенности настройки динамического хаоса и диагностики его составляющих. Показана возможность получения хаотических сигналов с непрерывным спектром в полосе частот, превышающей октаву.

Ключевые слова: неустойчивость, резонансная связь, синхронные колебания, динамический хаос.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Новиков С. С., Костерова В. С. Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 218—235.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Новиков, С. С. Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы / С. С. Новиков, В. С. Костерова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 218—235.

1. Введение

В системе двух связанных автогенераторов в зависимости от величины и характера взаимной связи могут возникать различные виды колебаний: как классические синхронные так и некогерентные [1, 2]. Оптимальными с точки зрения устойчивости синхронных режимов являются так называемые резистивные связи, обусловленные введением в каналы связи автогенераторов диссипативных элементов — нагрузок. В зависимости от типа (знака) резистивной связи в системе двух автогенераторов устойчивы либо синфазные, либо противофазные (или близкие к ним) синхронные колебания [3]. Реальные цепи связи обладают резонансными свойствами, влияние которых на устойчивость необходимо учитывать при решении тех или иных практических задач [4—7]. Как показывает опыт, сильные резонансные свойства каналов связи системы двух автогенераторов могут кардинально изменить поведение системы. Оценка влияния резонансных свойств на устойчивость синхронных колебаний была проведена в [8]. Позднее в [9—11] было теоретически и экспериментально показано, что при сильных резонансных связях «базовые» синхронные режимы теряют устойчивость (разрушаются) и на их месте возникает режим динамического хаоса. Существенная особенность модели состоит в том, что каждый из автогенераторов в автономном режиме является абсолютно стабильной одночастотной системой.

В данной работе методом численного моделирования исследуются динамические процессы развития неустойчивостей в системе двух автогенераторов с сильной резонансной связью.

2. Неустойчивости синхронных колебаний

Рассматриваемая в данной работе автоколебательная система имеет три степени свободы, то есть содержит три резонансных структуры. Собственные частоты подобных систем обычно определяются путем решения соответствующих характеристических уравнений, тогда как представления о типе (форме) собственных колебаний часто остается за пределами внимания исследователей. Вместе с тем, при рассмотрении вариантности динамических процессов определенную значимость и физическую наглядность приобретают представления о типах собственных движений и их устойчивости или неустойчивости. Подобная постановка задачи особенно актуальна при исследовании хаотических движений в динамических системах. Действительно, даже простейшие динамические системы в пространстве параметров способны демонстрировать разнообразные виды движений с бифуркационными переходами между ними. Среди них обычно можно вы-

делить базовые; в системах связанных автогенераторов к последним относятся виды синхронных колебаний. Хаотическая динамика возникает, когда все базовые движения неустойчивы, а вокруг них образуются области с неустойчивыми траекториями. Переходы между этими траекториями порождают хаотическую динамику. В связи с этим представляется, что структура указанных областей и их пересечений играет важную роль в развитии хаотической динамики. Это приобретает практическую важность при проектировании управляемых широкополосных источников. Поведение траекторий в процессе переходов несомненно зависит от локализации базовых частот и предопределяет спектрально-корреляционные характеристики динамического хаоса. В системе связанных автогенераторов основными синхронными модами являются синфазный и противофазный режимы. Рассмотрим далее способы реализации их неустойчивости.

Неустойчивость синфазных колебаний, приводящая к разрушению когерентности, может быть обусловлена сильными резонансными свойствами параметров связи. В качестве примера типичных резонансных свойств на рис. 1 приведен [11] профиль частотных характеристик проводимости связи $y_{12}(j\omega)$ простейшей цепи, изображенной на вкладке. В соответствии с этой схемой автогенераторы соединяются друг с другом и с общей нагрузкой g_n отрезками линии передачи с электрическими длинами θ_1 и θ_2 и с волновой проводимостью g_0 . Для данной схемы $\alpha_s = \theta_1 + \theta_2 \equiv \theta_\Sigma \sim \omega\tau$, где τ — время распространения сигнала в канале связи; $\theta = \theta_2 - \theta_1$ — параметр несимметрии; $g_n = 2g_0$ — проводимость согласованной общей нагрузки. Резонансные свойства проводимости связи непосредственно вытекают из формулы [2]:

$$y_{12} = \frac{-2s}{(\cos \alpha_s - 2s \cos \theta) + j \sin \alpha_s} g_0 \quad (1)$$

где s и α_s — модуль и аргумент элемента матрицы рассеяния $s_{12} = s \exp(-j\alpha_s)$. Величина s лежит в интервале (0—0.5), причем верхнее значение соответствует отсутствию потерь (погонных) в отрезках линии.

Характеристика $Rey_{12}(j\omega)$ является знакопеременной функцией частоты. Область частот последовательного резонанса, где $Rey_{12} < 0$, соответствует резистивной связи первого типа, при которой устойчивы синфазный или близкие к нему режимы колебаний. В области частот с резистивной связью второго типа ($Rey_{12} > 0$) устойчивы противофазный или близкие к нему режимы.

В работе [1] резонансные свойства описываются параметром

$$C_{12} = d(\operatorname{Im} y_{12}(j\omega))/d\omega \Big|_{\omega_0} \quad (2)$$

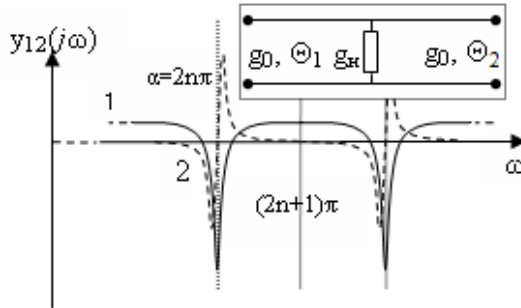


Рис. 1. Резонансные свойства проводимости связи, 1 — Rey_{12} ; 2 — Imy_{12} [11].

Fig. 1. Resonance properties of bond conductivity, 1 — Rey_{12} ; 2 — Imy_{12} [11]

Сильная резонансная связь первого типа реализуется в узких частотных интервалах вблизи $\alpha_s \approx 2\pi, 4\pi, \dots$, где $Rey_{12} < 0$. В этих интервалах в случае почти симметричной цепи ($\theta \approx 0$) и $s \rightarrow 0.5$ параметр C_{12} положителен ($C_{12} > 0$) и может достигать теоретически сколь угодно больших значений. При выполнении критерия

$$C_{12} > C_{кс}, \quad (3)$$

где $C_{кс}$ — емкости колебательных систем, синфазный режим становится неустойчивым и происходит переход либо к противофазному режиму (если он устойчив), либо к режиму динамического хаоса. В последнем случае имеет место разрушение когерентности [12].

Указанные сильные резонансные свойства взаимной связи автогенераторов реализуются также в схемах, представляющих собой комбинации отрезков линии передачи и нагрузок: антисимметричных схемах, схемах со многими нагрузками в волновом канале связи, а также в схемах, включающих реактивные элементы [13].

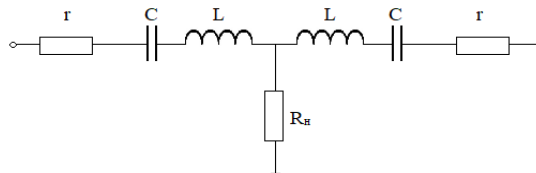


Рис. 2. Схема резонансной цепи связи.

Fig. 2. Scheme of the resonant conduction circuit

На рис. 2 приведена схема четырехполюсника связи исследуемой системы, в соответствии с которой автогенераторы соединяются друг с другом и с общей нагрузкой R_n через последовательные сосредоточенные резонансные контуры. Проанализируем резонансные свойства проводимо-

сти $y_{12}(j\omega)$ четырехполюсника; с целью упрощения будем считать его симметричным. В этом случае частотные характеристики описываются аналитическим выражением

$$y_{12}(j\omega) = -\frac{1}{(2 + \frac{z(j\omega)}{R_H})z(j\omega)} \quad (4)$$

где

$$z(j\omega) = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + jz(\omega)$$

— комплексное сопротивление последовательных rLC -контуров.

Профиль частотных характеристик показан на рис. 3. Как видно, $Rey_{12}(j\omega)$ является знакопеременной функцией частоты. Характер связи в резонансной области 2 соответствует резистивной связи 1-го типа: $Rey_{12} < 0$. На резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ проводимость связи равна действительной отрицательной величине

$$y_{12}(j\omega_0) = -1/\left(2 + \frac{r}{R_H}\right)r. \quad (5)$$

Ширина резонансной области определяется соотношением

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = (2R_H + r)r. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при любом R_H ширина резонансной области при уменьшении r сужается, а величина связи возрастает. Очевидно также, что уменьшение резонансной частоты ω_0 путем увеличения индуктивности L сужает указанную область, что соответствует увеличению добротности резонанса. При значительной отстройке частот генераторов от резонанса связи (области 1 и 3) имеем $Rey_{12} > 0$, $Imy_{12} \neq 0$ и $Imy_{12} \gg Rey_{12}$. При данном типе реальной части проводимости связи устойчивы противофазные колебания.

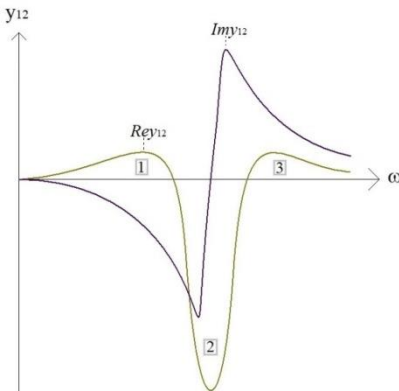


Рис. 3. Частотные характеристики проводимости связи.

Fig. 3. Frequency characteristics of the conduction of the bond

Поведение мнимой части проводимости связи ($Im y_{12}(j\omega)$) в области последовательного резонанса подобно рассмотренному выше примеру. Параметр C_{12} на резонансной частоте ω_0 определяется аналитически и равен

$$C_{12} = \frac{L}{r^2}. \quad (7)$$

Характерно, что (7) с точностью до коэффициента совпадает с выражением, приведенным в [3] в качестве частного примера. Представляет интерес управление устойчивостью синфазных колебаний в резонансной области 2. В соответствии с (3) и (7) устойчивость синфазных колебаний при настройке связи в резонанс может быть получена для любого L путем выбора достаточно большого значения омических потерь r . И, наоборот, при достаточно малых потерях выполняется критерий (3), и синфазный режим становится неустойчивым. Следует отметить, что в пределах области 2 параметр C_{12} изменяется и сохраняет положительный знак в интервале частот, который приближенно оценивается как

$$\omega_{\pm} \approx \omega_0 \pm \frac{r}{2L}. \quad (8)$$

Таким образом, при типичных добротностях 100—200 указанный частотный интервал весьма узкий. Поэтому в общем случае, когда полная цепь связи включает в себя элементы выходных цепей автогенераторов, практическая настройка резонанса связи представляет собой достаточно трудную задачу.

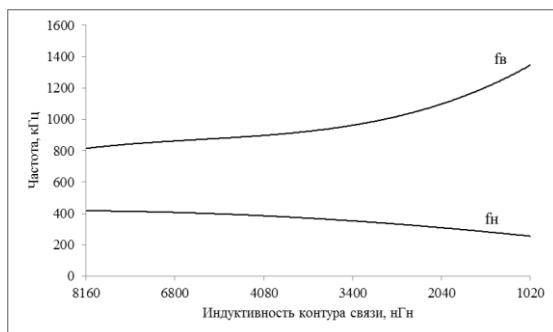


Рис. 4. Частоты противофазных типов колебаний.

Fig. 4. Frequencies of antiphase oscillation types

Рассмотренный выше критерий относится только к синфазной моде. Из соображений симметрии вытекает, что в системе могут существовать также противофазные колебания. Для противофазных колебаний в приближении равноамплитудности напряжение в точке подключения общей нагрузки равно нулю. Расчет собственных частот противофазных мод в

этом случае тривиален; на рис. 4 приведены их зависимости от индуктивности L колебательных контуров генераторов. Расчет проведен для частоты $f_0 = 550$ кГц; в численном эксперименте эта частота равна парциальным частотам автогенераторов, а также частоте синхронного синфазного режима. Таким образом, в системе кроме синфазных колебаний могут существовать две противофазные моды с частотами f_n и f_b , соответственно ниже и выше f_0 . Как видно из рис. 4, при уменьшении индуктивности (и при сохранении резонанса) эти частоты расходятся.

Неустойчивость противофазных мод реализуется другим способом. Так, известно [14], что в автогенераторных схемах при большой положительной обратной связи транзистор работает в сильном перенапряженном режиме; его колебательная характеристика вблизи стационарного состояния имеет большой отрицательный наклон, что приводит к неустойчивости периодических колебаний. (В радиотехнике подобная неустойчивость иллюстрируется с помощью диаграмм Ламерея). Эффективное управление колебательной характеристикой активного элемента — транзистора осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по току. Такая связь реализуется включением в цепь эмиттера резистора R_e (рис. 5).

3. Численное исследование динамических процессов

Исследуемая в численном эксперименте схема (рис. 5) представляет собой два транзисторных автогенератора, соединенных друг с другом через резонансную цепь связи. В модели использовался высокочастотный маломощный (с током до 100 мА) биполярный транзистор. Автогенераторы собраны по схеме емкостной трехточки (цепи питания транзисторов на рис. 5 не показаны). Схема резонансного четырехполюсника связи состоит из последовательных колебательных контуров r , C , L и полностью соответствует рис. 2. Для численных исследований использовалась программа *NI Multisim*. Частота работы автономных автогенераторов $f_0 = 550$ кГц задается элементами $C_{1,2}$, $L_{1,2}$. Для исследования временной динамики колебаний в синфазном и противофазном режимах в цепь базы в качестве начальных условий вводились ступенчатые напряжения одинаковых (++) или разных (+-) знаков.

В ходе экспериментов наблюдались и регистрировались колебательные напряжения, развиваемые автогенераторами на контурах автогенераторов и на общей нагрузке в процессе их возбуждения и развития, а также текущие спектры этих колебаний. Устойчивость синфазного режима при резонансной настройке цепи связи реализуется только при достаточно больших величинах r , когда выполняется неравенство, обратное (3). В

случае полной симметрии схемы и при идентичности автогенераторов частота стационарных синхронных колебаний в синфазном режиме действительно равна парциальным частотам автогенераторов. Противофазный режим на частоте f_0 из-за больших вносимых (со стороны r) потерь существовать не может. Условия устойчивости противофазных колебаний, как уже сказано выше, реализуются в областях 1 и 3 (рис. 3), то есть при достаточно большой отстройке резонанса связи. Такая отстройка автоматически возникает за счет значительного разноса собственных частот противофазных мод (см. рис. 4). Здесь следует заметить, что при произвольном выборе резонанса связи противофазные колебания, как правило, оказываются устойчивыми. Таким образом, с точки зрения устойчивости противофазные моды являются доминирующими.

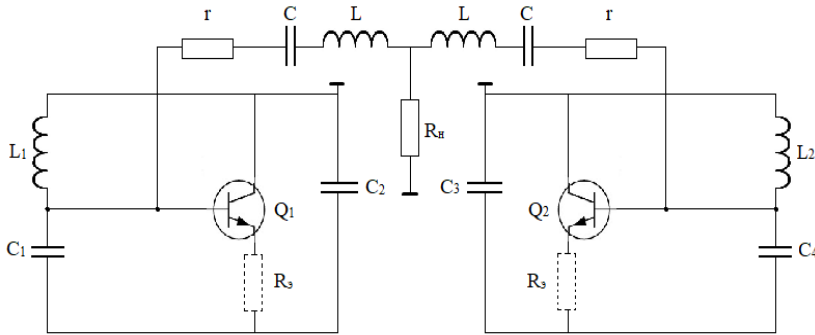


Рис. 5. Высокочастотная схема системы связанных автогенераторов с резонансной связью.

Fig. 5. High-frequency circuit of a system of coupled self-oscillators with resonant coupling

Данная типичная ситуация иллюстрируется следующим экспериментом. При синфазных начальных условиях (++) сначала возбуждаются и нарастают синфазные колебания, затем появляется одна из противофазных мод, которая нарастает и подавляет синфазную моду. Суперпозиция двух колебаний разных частот в переходном процессе представляет собой биеения, огибающая которых сначала нарастает, а затем убывает (рис. 6, 7).

Условия одновременной устойчивости синфазных и противофазных колебания выполняются на краях интервала (8), где $Re y_{12}(j\omega) \approx 0$ и проводимость связи характеризуется значительной реактивной составляющей. В численном эксперименте эти типы колебаний реализуются путем смены начальных условий (++) или (+-).

Дальнейшие представленные эксперименты проводились при резонансной настройке и при выполнении критерия (3). Неустойчивость противофазных мод реализуется путем увеличения степени регенерации системы при последовательном уменьшении сопротивления отрицательной

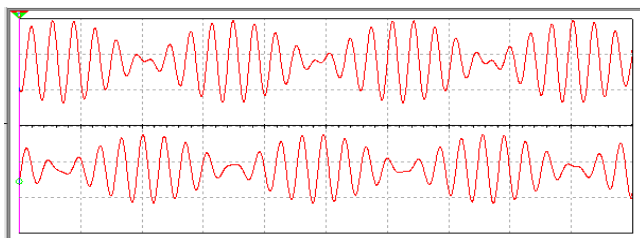


Рис. 6. Осциллограммы колебаний автогенераторов — переход в противофазный режим;
 $L = 4020 \text{ нГн}$, $C = 20 \text{ нФ}$.

Fig. 6. Oscillograms of oscillations of self-oscillators – transition to antiphase mode;
 $L = 4020 \text{ нГн}$, $C = 20 \text{ нФ}$

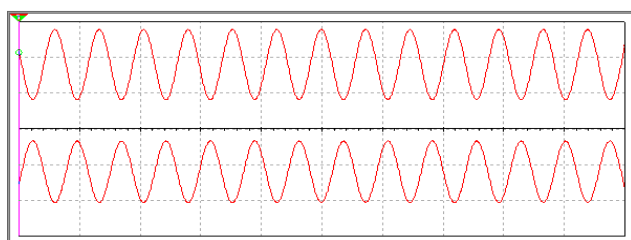


Рис. 7. Осциллограммы колебаний — противофазный режим работы;
 $L = 1020 \text{ нГн}$, $C = 80 \text{ нФ}$.

Fig. 7. Oscillograms of oscillations – antiphase mode of operation;
 $L = 1020 \text{ нГн}$, $C = 80 \text{ нФ}$

обратной связи R_3 . Для идентификации базовых мод и их преобразований непосредственно использовались свойства симметрии схемы. Действительно, в процессе развития колебаний при переходе к квазигармоническим или хаотическим режимам фазовая точка обязательно на некоторое время попадает в область притяжения того или иного аттрактора. В результате этого в спектре в области частот соответствующей моды появляется дискретная или континуальная составляющая. Сравнение спектров колебаний автогенераторов со спектром на общей нагрузке позволяет однозначно определить синфазную и противофазную моды. Так, синфазные компоненты спектра и их гармоники суммируются в общей нагрузке, тогда как нечетные гармоники противофазных мод вычитаются, а их четные гармоники — суммируются.

На рис. 8 приведены спектры колебаний на одном из контуров генераторов и на общей нагрузке в установившемся режиме для случая трехчастотных колебаний. (Здесь и далее цена деления по оси ординат — 20 дБ.) Этот вариант соответствует $R_3 = 4 \text{ Ом}$ и следующим параметрам цепи связи: $L = 4080 \text{ нГн}$, $C = 15 \text{ нФ}$, $r = 0,021 \text{ Ом}$. Как видно, в спектре генератора при-

сутствуют три моды: нижняя противофазная мода (384 кГц), синфазная мода (550 кГц) и верхняя противофазная мода (932 кГц). В спектре на общей нагрузке составляющие с частотами 384 кГц и 932 кГц практически отсутствуют, что подтверждает противофазность соответствующих колебаний. Кроме этого в спектрах колебаний присутствует составляющая, соответствующая второй гармонике (768 кГц) нижней противофазной моды. Так как вторые гармоники синфазны, то в общей нагрузке они суммируются.

Следует заметить, что значения приведенных частот отличаются от расчетных не более чем на 1.5 %.

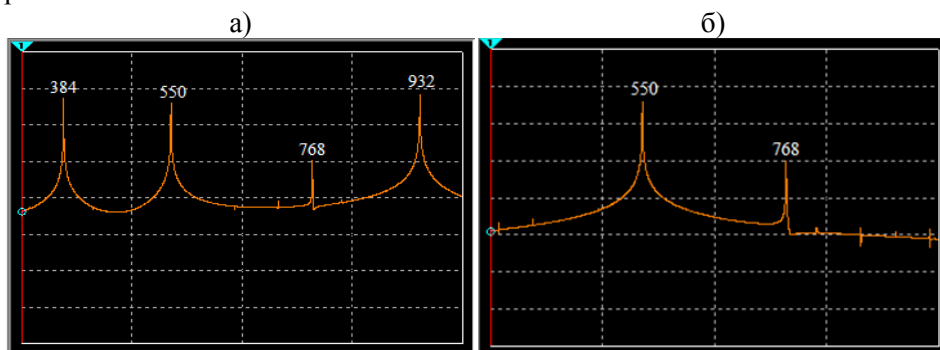


Рис. 8. Спектры трехчастотного режима: а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—1000 кГц.

Fig. 8. Spectra of the three-frequency regime: а) – on the oscillator circuit; б) – on the total load. Band 320–1000 kHz

На рис. 9 для того же случая приведены осциллограммы колебаний на контурах генераторов (две верхние осциллограммы) и на общей нагрузке (нижняя осциллограмма). Как видно, противофазные составляющие колебаний действительно вычитаются, а синфазные — суммируются

Еще один характерный вариант поведения базовых видов колебаний наблюдается при несколько измененных параметрах системы (также при сохранении резонанса): $L = 5440$ нГн, $C = 11,24$ нФ, $R_3 = 2,9$ Ом. При синфазном возбуждении (++) система начинает сначала генерировать в синфазном режиме, затем через некоторое время система переходит в противофазный режим с частотой 410,64 кГц (рис. 10). В спектре при этом появляются колебания противофазных мод и их гармоник. Следует отметить, что колебания обеих противофазных мод на всем протяжении переходного процесса вычитаются в общей нагрузке. В конце переходного процесса синфазная и верхняя противофазная моды подавляются, и система устойчиво генерирует на частоте нижней противофазной моды 410 кГц с ее гармониками (рис. 11а). Характерно, что **нечетные** гармоники вычитаются в общей нагрузке, а **нечетные** — складываются (рис. 11б).

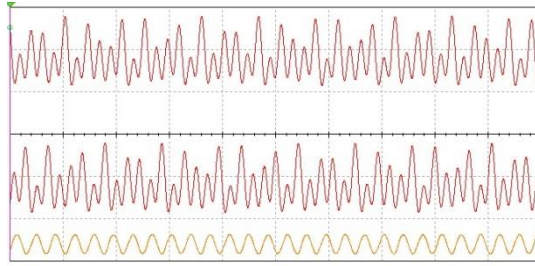


Рис. 9. Осциллограммы колебаний автогенераторов в установившемся режиме:

$L = 4080 \text{ нГн}$, $C = 15 \text{ нФ}$, $r = 0,021 \text{ Ом}$, $R_3 = 4 \text{ Ом}$.

Fig. 9. Oscillograms of oscillations of self-oscillators in steady state:

$L = 4080 \text{ nH}$, $C = 15 \text{ nF}$, $r = 0.021 \text{ Ohm}$, $R_3 = 4 \text{ Ohm}$

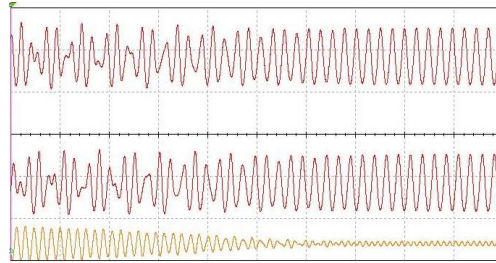


Рис. 10. Осциллограммы колебаний автогенераторов при переходе в противофазный режим: $L = 5440 \text{ нГн}$, $C = 11,24 \text{ нФ}$, $r = 0,002 \text{ Ом}$, $R_3 = 2,9 \text{ Ом}$.

Fig. 10. Oscillograms of oscillations of self-oscillators during the transition to antiphase mode: $L = 5440 \text{ nH}$, $C = 11.24 \text{ nF}$, $r = 0.002 \text{ Ohm}$, $R_3 = 2.9 \text{ Ohm}$

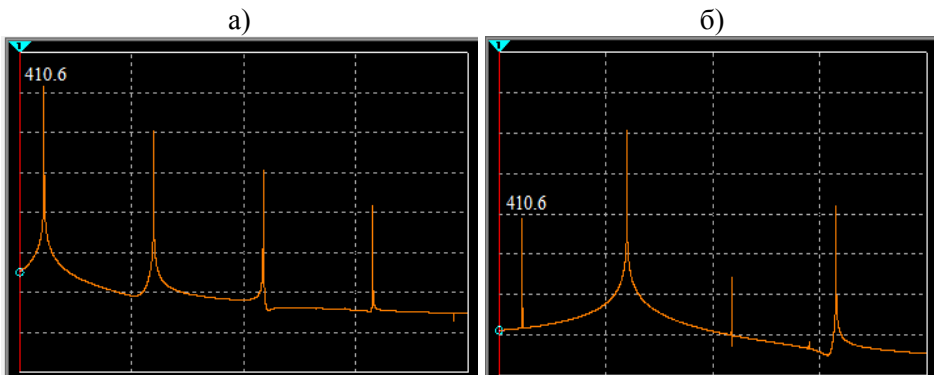


Рис. 11. Спектры колебаний:

а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—2000 кГц.

Fig. 11. Oscillation spectra:

а) – on the oscillator circuit; б) – on the total load. Band 320–2000 kHz

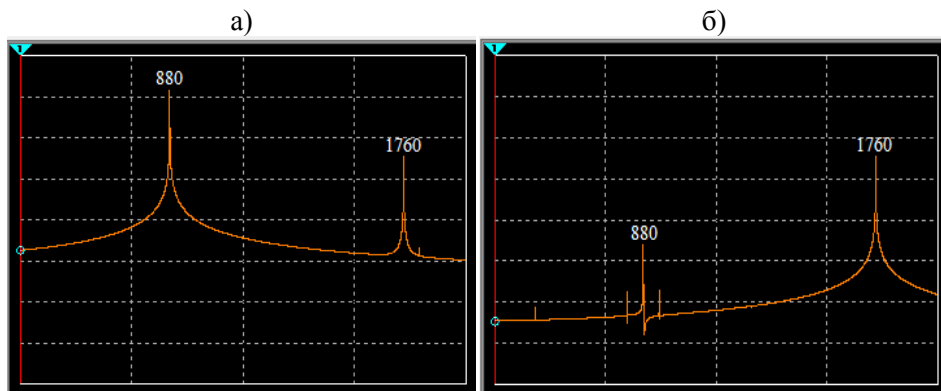


Рис. 12. Спектры колебаний при возбуждении (+ –):

а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—2000 кГц.

Fig. 12. Spectra of oscillations during excitation (+ –):

а) – on the oscillator circuit; б) – on the total load. Band 320—2000 kHz

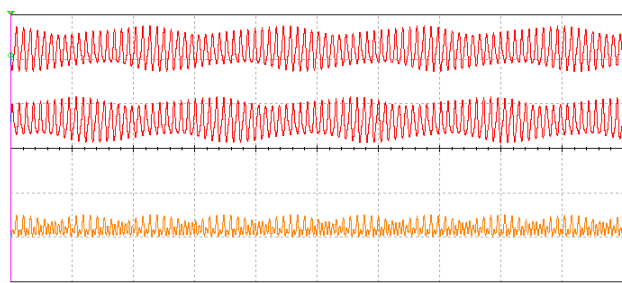


Рис. 13. Осциллограммы колебаний автогенераторов:

$L = 8160$ нГн, $C = 7,5$ нФ, $r = 0,002$ Ом, $R_3 = 1,61$ Ом.

Fig. 13. Oscillograms of oscillations of self-oscillators:

$L = 8160$ nH, $C = 7.5$ nF, $r = 0.002$ Ohm, $R_3 = 1.61$ Ohm

Для этого же варианта схемы в случае задания противофазных начальных условий (+–) с самого начала возбуждается верхняя противофазная мода (ее частота 880 кГц совпадает с расчетной) и ее гармоника (рис. 12). Таким образом, при данной настройке в системе существует один из противофазных режимов. При синфазных и противофазных начальных условиях синфазный режим либо подавляется, либо не возбуждается вовсе.

В процессе настройки исследуемой схемы часто наблюдаются автомодуляционные процессы. Пример таких процессов приведен на осциллограммах (рис. 13), где две верхние осциллограммы — это колебания на контурах автогенераторов, а нижняя — на общей нагрузке. Так как «несу-

щие» колебания противофазны, то центральные составляющие нечетных гармоник несущего колебания вычитаются, а четных — суммируются (рис. 14). В то же время, так как закон модуляции почти противофазный, то боковые (модуляционные) составляющие для четных гармоник вычитаются, и суммируются — для нечетных.

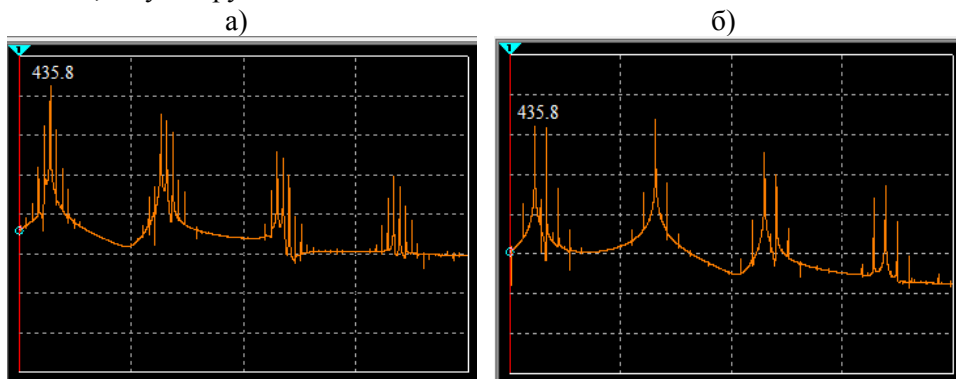


Рис. 14. Спектры колебаний при автомодуляции:

а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—2000 кГц.

Fig. 14. Oscillation spectra during self-modulation:

а) – on the self-oscillator circuit; б) – on the total load. Band 320–2000 kHz

Развитой динамический хаос возникает в системе для варианта $L = 5440$ нГн, $C = 11,24$ нФ, $r = 0,002$ Ом при $R_3 = 0,017$ Ом. Именно при данной или близких настройках происходит существенное изменение динамики развития неустойчивости и поведения системы в целом. При синфазных начальных условиях колебания генераторов первоначально происходят в фазе (рис. 15), а затем быстро, в течение 10—12 периодов, полностью теряют признаки периодичности; при этом их форма сильно отличается от гармонической. При дальнейшем наблюдении форма колебаний еще больше искажается и на осциллограммах (рис. 16) уже невозможно выделить синфазную и противофазные компоненты. В системе устанавливается режим хаотических колебаний.

Рассчитанные спектры колебаний хаотического режима на контурах автогенераторов и на общей нагрузке представлены на рис. 17. В спектре присутствуют три характерных компоненты. Первый, самый низкочастотный (395,1 кГц) пик соответствует нижней противофазной моде. «Размытый» максимум в районе 550—580 кГц соответствует синфазной моде. Следующий спектральный пик на частоте 790,2 кГц является второй гармоникой нижней противофазной моды; эти гармоники колебаний автогенераторов синфазны и суммируются в общей нагрузке. Верхняя противо-

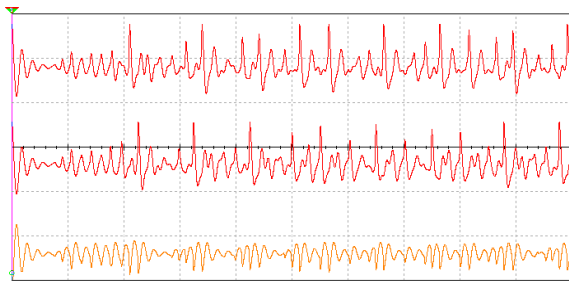


Рис. 15. Осциллограммы колебаний автогенераторов при переходе к хаотическому режиму:
 $L = 5440 \text{ нГн}$, $C = 11,24 \text{ нФ}$, $r = 0,002 \text{ Ом}$, $R_3 = 0,017 \text{ Ом}$.

Fig. 15. Oscillograms of oscillations of self-oscillators during the transition to a chaotic mode:
 $L = 5440 \text{ nH}$, $C = 11.24 \text{ nF}$, $r = 0.002 \text{ Ohm}$, $R_3 = 0.017 \text{ Ohm}$

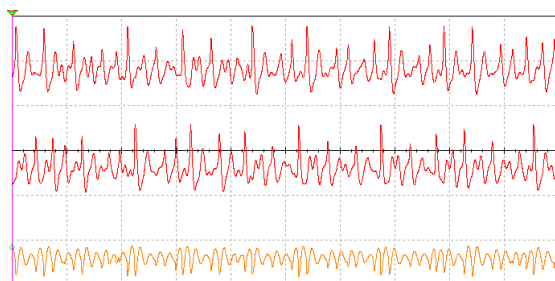


Рис. 16. Осциллограммы колебаний автогенераторов в режиме динамического хаоса:
 $L = 5440 \text{ нГн}$, $C = 11,24 \text{ нФ}$, $r = 0,002 \text{ Ом}$, $R_3 = 0,017 \text{ Ом}$.

Fig. 16. Oscillograms of oscillations of self-oscillators in the mode of dynamic chaos: $L = 5440 \text{ nH}$, $C = 11.24 \text{ nF}$, $r = 0.002 \text{ Ohm}$, $R_3 = 0.017 \text{ Ohm}$

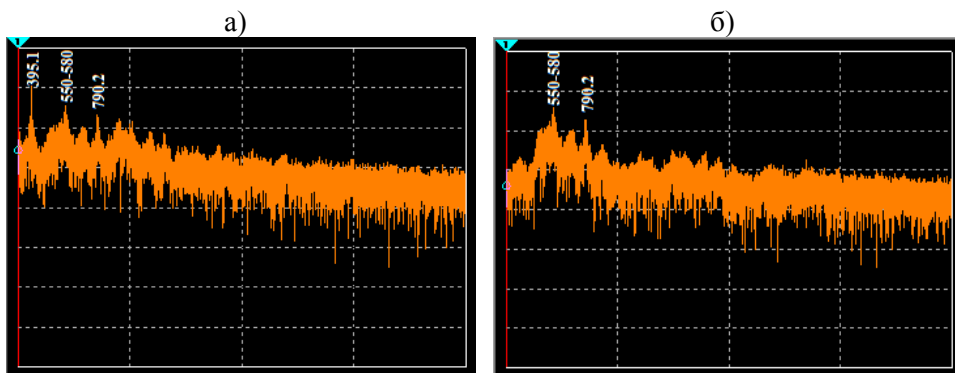


Рис. 17. Спектры хаотических колебаний: а) — на контуре автогенератора;
 б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—3000 кГц.

Fig. 17. Spectra of chaotic oscillations: а) – on the oscillator circuit;
 б) – at the total load. Band 320–3000 kHz

фазная мода (по расчету в районе 878 кГц) зашумлена и в спектре не просматривается. Приведенный на рис. 17 шумовой спектр занимает полосу от 320 кГц до 3 МГц, то есть простирается далеко за пределы частоты верхней моды. Полоса шумового сигнала значительно превышает октаву.

Результаты проведенного моделирования позволяют связать способность системы генерировать динамический шум в широкой полосе частот со значительным разнесом частот собственных колебаний-мод. Это обусловлено применением резонансной схемы связи на сосредоточенных элементах. Реализация подобных соединений на СВЧ возможна при использовании интегральной технологии.

4. Заключение

В настоящей работе рассмотрена система двух автогенераторов, связанных друг с другом и с общей нагрузкой непосредственно через последовательные резонансные контуры. Показано, что данная система может генерировать на трех частотах различных мод. Проведен анализ частотных характеристик параметра взаимной связи и сформулирован аналитический критерий неустойчивости синфазных колебаний. Для получения неустойчивости противофазных колебаний использовался перенапряженный режим работы транзисторов, регулируемый с помощью отрицательной обратной связи по току. Методом численного моделирования изучен характер процессов развития неустойчивостей при переходах к динамическому хаосу. Показано, что система связанных автогенераторов при разрушении когерентности переходит в режим генерации динамического хаоса с непрерывным спектром в широкой полосе частот.

Список литературы

1. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Неустойчивость синхронных режимов в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 11. С. 51—56.
2. Новиков С. С., Майдановский С. А. Симметричные и несимметричные системы сильно связанных автогенераторов // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 5. С. 595—600.
3. Владимиров С. Н., Майдановский А. С., Новиков С. С. Нелинейные колебания много-частотных автоколебательных систем // Томск : Изд. Том. ун-та, 1993. 203 с.
4. Shigeji N., Jenshan L., Tatsuo I. Mode analysis and stabilization of a spatial power combining array with strongly coupled oscillators // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1993. V. 41, no.10. P. 1827—1837.
5. Ram R. J., Sporer R., Blank H.-R., York R. A.. Chaotic Dynamics in Coupled Microwave Oscillators // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2000. V. 48, no. 11. P. 1909—1916.

6. Lynch J. J., York R. A. Synchronization of Oscillators Coupled Through Narrow-Band Networks // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2001. Vol. 49, no. 2. P. 237—249.
7. Винтизенко И. И., Новиков С. С. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы. Томск : Издательство НТЛ, 2009. 430 с.
8. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Разрушение когерентного режима в системе двух автогенераторов при сильных резонансных взаимных связях // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 5. С. 14—25.
9. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Явление разрушения когерентности в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 9/2. С. 16—20.
10. Novikov S. S. Hyper-chaos mode in the mutual coupled and partial stable microwave oscillators system // Progress In Electromagnetics Research Symposium : proceedings. St. Petersburg, 2017. P. 1065—1069.
11. Новиков С. С. Бифуркационные переходы в системе двух СВЧ автогенераторов при резонансной взаимной связи. В сб. : Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019. Сборник трудов конференции. Томск, 2019. С. 200—205.
12. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Динамические режимы системы двух связанных СВЧ автогенераторов. В сб. : 24-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2014 (Севастополь, 7—13 сент. 2014 г.). 2014. С. 109—110.
13. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Цепи связи для систем свч автогенераторов с хаотической динамикой. В сб. : 25-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2015 (Севастополь, 6—12 сент. 2015 г.). 2015. С. 525—526.
14. Антипов О. И., Неганов В. А., Потапов А. А. Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / Под ред. и с предисловием акад. Ю. В. Гуляева и чл.-корр. РАН С. А. Никитова. М. : Радиотехника, 2009. 235 с.

Информация об авторах

Новиков Сергей Сергеевич, к. ф.-м. н., доцент Национального исследовательского Томского государственного университета, Российская Федерация.

Костерова Влада Сергеевна, магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета, Российская Федерация.

Stable and Unstable Dynamic Processes in a Self-Oscillating System with Three Degrees of Freedom

S. S. Novikov and V. S. Kosterova

National Research Tomsk State University
36, Lenin Ave. Tomsk, 634050, Russian Federation
nss@sibmail.com, vsk727@yandex.ru

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: The work is devoted to the study of the dynamic instability of coherent regimes of a system of two self-oscillators with a strong mutual resonant coupling. It is shown that this system can generate synchronous oscillations at three different frequencies, they correspond to the basic types of oscillations-modes: one in-phase and two anti-phase. A qualitative analysis of the influence of the characteristics of the resonant coupling on the stability of natural synchronous modes of oscillations has been carried out. An analytical criterion for the instability of in-phase oscillations and the conditions for its fulfillment are considered. The possibility of suppressing the stability of antiphase oscillations is discussed. The method of numerical simulation was used to study the temporal and spectral characteristics of oscillatory processes in various modes, including chaotic. Variants of the system behavior under competition and mode suppression accompanied by self-modulation processes are demonstrated. The features of dynamic chaos tuning and diagnostics of its components are discussed. The possibility of obtaining chaotic signals with a continuous spectrum in a band exceeding an octave is shown.

Keywords: instability, resonant coupling, synchronous oscillations, dynamic chaos.

For citation (IEEE): S. S. Novikov and V. S. Kosterova, "Stable and Unstable Dynamic Processes in a Self-Oscillating System with Three Degrees of Freedom," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 218–235, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.16. (In Russ.).

References

- [1] S. S. Novikov and A. A. Usjukevitch, "Instability of synchronous mode in a system of two coupled microwave self-oscillators," *Russian Physics Journal*, vol. 55, no. 11, pp. 1296–1302, Apr. 2013, doi: 10.1007/s11182-013-9959-x. (In Russ.).
- [2] S. S. Novikov and S. A. Maidanovsky, "Symmetric and asymmetric systems of strongly coupled self-oscillators," *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 48, no. 5, pp. 595–600, 2003. (In Russ.).
- [3] S. N. Vladimirov, A. S. Maidanovsky, and S. S. Novikov, *Nonlinear oscillations of multi-frequency self-oscillating systems*, Tomsk: Tomsk Univ., 1993. (In Russ.).
- [4] S. Nogi, Jenshan Lin, and T. Itoh, "Mode analysis and stabilization of a spatial power combining array with strongly coupled oscillators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 10, pp. 1827–1837, 1993, doi: 10.1109/22.247929.

- [5] R. A. York, H.-R. Blank, R. Sporer, and R. J. Ram, "Chaotic dynamics in coupled microwave oscillators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 11, pp. 1909–1916, 2000, doi: 10.1109/22.883871.
- [6] J. J. Lynch and R. A. York, "Synchronization of oscillators coupled through narrow-band networks," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 2, pp. 237–249, 2001, doi: 10.1109/22.903084.
- [7] I. I. Vintizenko and S. S. Novikov, *Relativistic magnetron microwave generators*, Tomsk: NTL Publishing House, 2009. (In Russ.).
- [8] S. S. Novikov and A. A. Usyukevich, "Destruction of the coherent regime in a system of two self-oscillators with strong resonant mutual coupling," *Izv. vuzov. Applied nonlinear dynamics*, vol. 20, no. 5, pp. 16–30, 2012. (In Russ.).
- [9] S. S. Novikov and A. A. Usyukevich, "Phenomenon of destruction of coherence in the system of two coupled microwave self-oscillators," *Izv. vuzov. Physics*, vol. 57, no. 9/2, pp. 16–20, 2014. (In Russ.).
- [10] S. S. Novikov, "Hyper-chaos mode in the mutual coupled and partial stable microwave oscillators system," *Progress in Electromagnetics Research Symposium: proceedings*. St. Peterburg, pp. 1065–1069, 2017.
- [11] S. S. Novikov, "Bifurcation transitions in a system of two microwave self-oscillators with resonant mutual coupling," *Actual problems of radiophysics APR 2019: Proceedings of the conference*. Tomsk, pp. 200–205, 2019. (In Russ.).
- [12] S. S. Novikov and A. A. Usyukevich, "Dynamic modes of two coupled microwave oscillators," *Proc. 24th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Sevastopol, Crimea, Russia, pp. 109–110, 2014. (In Russ.).
- [13] S. S. Novikov and A. A. Usyukevich "Coupling circuits for microwave self-oscillator systems with chaotic dynamics," *Proc. 25th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Sevastopol, Crimea, Russia, pp. 525–526, 2015. (In Russ.).
- [14] O. I. Antipov, V. A. Neganov, and A. A. Potapov, *Deterministic Chaos and Fractals in Discrete Nonlinear Systems*, Moscow: Radiotekhnika, 2009. (In Russ.).

Information about the authors

Sergey S. Novikov, Ph.D., Associate Professor, National Research Tomsk State University, Russian Federation.

Vlada S. Kosterova, master student of the National Research Tomsk State University, Russian Federation.

УДК 656.61

Метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции

Громоздин В. В., Иевлев К. В., Козуб М. С., Новикова Т. В.

*Испытательный центр «Омега» — филиал ФГУП НИИР
ул. Вакуленчука, 29, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
gromozdin@niir.ru, ivlev@niir.ru, kozub@niir.ru, panina@niir.ru*

Получено: 19 апреля 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В работе рассмотрен опытно-теоретический метод проведения испытаний береговой радиолокационной станции (БРЛС) с применением испытательной цели с уменьшенной эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР), что позволяет учесть влияние осадков различной интенсивности при проведении испытаний в условиях отсутствия осадков. Рассмотрены ограничения при выборе ЭПР испытательной цели как по верхней границе, обусловленной техническими параметрами испытываемой БРЛС и дальностью радиогоризонта, так и по нижней границе, обусловленной волнением моря и отражениями от морской поверхности.

Ключевые слова: система управления движением судов, береговая радиолокационная станция, эффективная поверхность рассеяния, дальность действия, энергетический потенциал, интенсивность осадков.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции / В. В. Громоздин, К. В. Иевлев, М. С. Козуб, Т. В. Новикова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 236—246.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции / В. В. Громоздин, К. В. Иевлев, М. С. Козуб, Т. В. Новикова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 236—246.

1. Введение

Береговые радиолокационные станции являются одними из основных технических средств системы управления движением судов (СУДС), предназначенной для улучшения безопасности и эффективности движения

судов и для защиты окружающей среды¹. Эксплуатация СУДС должна иметь под собой юридическую основу и эксплуатироваться в соответствии с национальным и международным правом, а сам район обслуживания должен иметь установленные границы. Сведения о зоне действия СУДС, выполняемых функциях, процедурах связи с судами и другая необходимая информация направляются администрацией СУДС в международную ассоциацию маячных служб (МАМС) для публикации в международном справочном руководстве *World VTS Guide*. Под зоной действия СУДС понимается зона, которая перекрывается рабочими зонами основных технических средств. Рабочие зоны определяются для каждого вида основных технических средств СУДС посредством проведения натурных испытаний² по завершении строительства (реконструкции) СУДС, а также при вводе в эксплуатацию новых объектов и технических средств в целях установления фактических географических границ рабочих зон и других эксплуатационных характеристик технических средств³.

В соответствии с рекомендацией⁴ БРЛС обеспечивает обнаружение небольших целей в сложных погодных условиях. Способность обнаруживать цели в осадках должна быть определена для системы органом СУДС на основе статистической информации о погодных условиях, получаемых от местных метеорологических служб, включая частоту выпадения осадков и их интенсивность, размер капель и т. д. В условиях выпадения осадков дальность обнаружения может быть уменьшена до 25 % от максимально возможной, исходя из количества нормальных осадков, определенных для данного района, что предполагает получение приемлемой частоты ложных тревог. Учитывая резкий рост затухания сигнала с ростом частоты, при осадках более 25 мм/ч для обеспечения требований должны использоваться радары, работающие в диапазоне 2,900—3,100 МГц (S-диапазон)⁵. Во многих случаях осадки не являются однородными, и должна указываться рабочая зона БРЛС в осадках, типичных для конкретного участка. Для упрощения допускается, что осадки однородны. Например, в приказе³ указано, что осадки присутствуют на протяжении всей рабочей

¹ ИМО Резолюция А.857(20). Руководство для служб движения судов.

² Приказ Минтранса РФ от 10 февраля 2010 г. № 32. Об утверждении Положения об одобрении типов аппаратуры и освидетельствовании объектов и центров.

³ Приказ Министерства транспорта России от 23.07.2015 N 226. Об утверждении Требований к радиолокационным системам управления движением судов, объектам инфраструктуры морского порта, необходимым для функционирования Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности, объектам и средствам автоматической информационной системы, службе контроля судоходства и управления судоходством.

⁴ IALA Recommendation V-128. On Operational and Technical Performance Requirements for VTS Equipment. Edition 3.0. 2007.

⁵ Vessel Traffic Services Manual (IALA VTS Manual).

зоны БРЛС и регламентируются следующие возможные значения их интенсивности: 4 мм/ч, 10 мм/ч и 16 мм/ч.

Таким образом, определение рабочих зон БРЛС является достаточно важной и актуальной задачей, но определение рабочих зон БРЛС в условиях осадков посредством проведения натурных испытаний имеет существенную проблему, заключающуюся в том, что обеспечить заданную интенсивность осадков на требуемом протяжении трассы (или на участке трассы) практически невозможно. Целью данной работы является разработка метода проведения испытаний, определяющих рабочую зону БРЛС с учетом влияния осадков заданной интенсивности.

2. Основная часть

Наличие осадков приводит к затуханию энергии радиоволн, что обусловлено поглощением их энергии каплями воды. Учитывая, что в основном уравнении радиолокации значение излучаемой мощности стоит под корнем четвертой степени, дополнительное затухание радиоволн за счет осадков приводит к снижению дальности действия РЛС в соответствии с формулой:

$$r_{п_max} = r_{a_max} \cdot 10^{-0,05 \cdot \gamma_{RD} \cdot \Delta r}, \quad (1)$$

где

$r_{п_max}$ — максимальная дальность действия РЛС в атмосфере с учетом осадков;

γ_{RD} — гонное ослабление в осадках, дБ/км;

Δr — участок трассы, на котором происходит затухание, км;

r_{a_max} — максимальная дальность действия РЛС в атмосфере без осадков, и которая определяется формулой:

$$r_{a_max} = r_{0_max} \cdot 10^{-0,05 \cdot \gamma_{RA} \cdot \Delta r}$$

где r_{0_max} — максимальная дальность действия РЛС в среде без потерь.

Соотношение между погонным ослаблением γ_{RD} (дБ/км) и интенсивностью осадков R (мм/ч) описывается степенным законом, приведенным в рекомендации⁶:

$$\gamma_{RD} = k \cdot R^{\alpha} \quad (3)$$

В соответствии с приведенными в рекомендации⁶ методиками расчета коэффициентов k и α погонное затухание в осадках γ_{RD} на частотах S - и X -

⁶ Рекомендация МСЭ-R P.838-2. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.

диапазонов, регламентируемых ИМО⁷ для береговых радаров, приведено в таблице 1.

Таблица 1. Значения погонных затуханий в осадках

Table 1. Values of per unit attenuation in precipitation

Интенсивность осадков R (мм/ч)	Частота (ГГц)	Погонное затухание в дожде γ_{RD} (дБ/км)	
		Горизонтальная поляризация	Вертикальная поляризация
4	3	0,0014	0,0012
	9,4	0,042	0,036
10	3	0,0037	0,0031
	9,4	0,139	0,119
16	3	0,0059	0,0049
	9,4	0,257	0,219

На рисунках 1 и 2 сплошной линией приведены графики зависимости от расстояния относительного снижения максимальной дальности действия БРЛС в условиях с осадками заданной интенсивности $r_{п_max}$ к максимальной дальности РЛС в условиях без осадков r_{a_max} для частот 3 ГГц и 9,4 ГГц для горизонтальной и вертикальной поляризации. Данные графики построены из предположения того, что заданная интенсивность осадков действует на протяжении всей дальности действия БРЛС, т. е. при $\Delta r = r_{a_max}$.

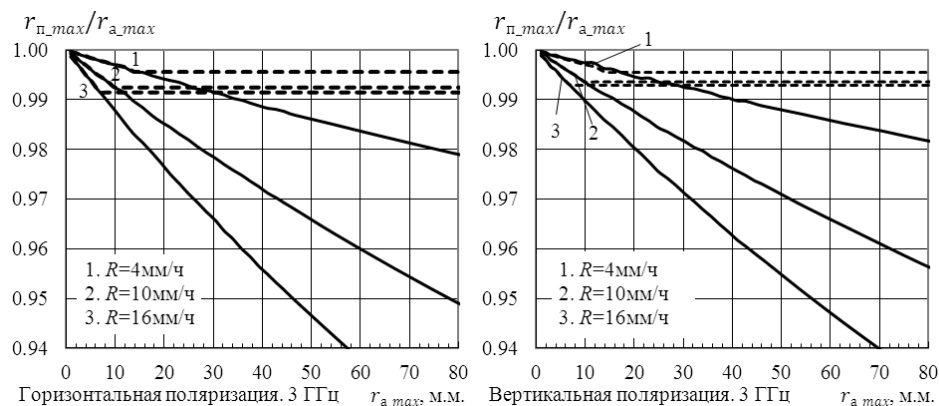


Рис. 1. Зависимость $r_{п_max}/r_{a_max}$ от расстояния для частоты 3 ГГц.

Fig. 1. Dependence of $r_{п_max}/r_{a_max}$ on the distance for a frequency of 3 GHz

⁷ Резолюция ИМО MSC192(79). Принятие пересмотренных эксплуатационных требований к радиолокационному оборудованию. 2004.

Из рисунков 1 и 2 следует, что влияние осадков в диапазоне 3 ГГц достаточно незначительно, в то время как в диапазоне частот 9,4 ГГц осадки существенно сказываются на максимальной дальности БРЛС. Именно это и определяет в основном тот факт, что для получения более высокого разрешения, как правило, используются БРЛС X-диапазона, тогда как РЛС S-диапазона используется в основном в условиях повышенных осадков, т. е. БРЛС S-диапазона используются достаточно редко.

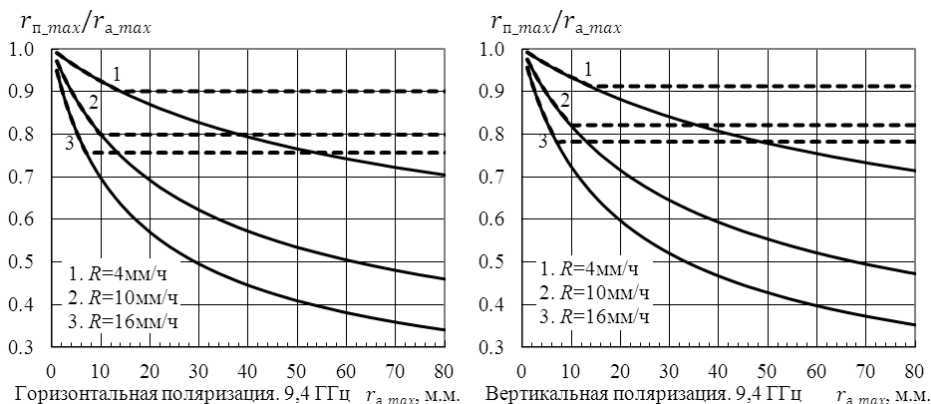


Рис. 2. Зависимость $r_{п, max}/r_{a, max}$ от расстояния для частоты 9,4 ГГц.

Fig. 2. Dependence of $r_{п, max}/r_{a, max}$ on the distance for a frequency of 9,4 GHz

Следует отметить, что на практике полученные данные об уменьшении дальности действия за счет интенсивности осадков являются завышенными, поскольку расчеты проведены для случая однородного в пространстве дождя, чего в природе при таких интенсивностях практически не наблюдается. Высокая интенсивность осадков, как правило, очень локализована. При больших интенсивностях основная масса выпадающего дождя сосредоточена в ячейке с диаметром порядка от 10 до 15 км.

Рекомендация МАМС⁸ дает общую формулу для диаметра пятна с осадками, которая пригодна для осадков интенсивностью R до 57 мм/ч:

$$D = 41,595 - 23,608 \cdot \log(R) \quad (4)$$

где D — диаметр пятна осадков, км.

При интенсивностях осадков 4 мм/ч, 10 мм/ч и 16 мм/ч диаметр пятна составляет 27,4 км, 18 км и 13,2 км соответственно. Дополнительное затухание радиоволн за счет локализованных осадков приводит к снижению дальности действия РЛС в соответствии с формулой (2) при условии:

⁸ IALA Guideline 1111. Preparation of operational and technical performance requirements for VTS systems.

$$\Delta r = \begin{cases} r_{a_max} & \text{при } r_{a_max} < D \\ D & \text{при } r_{a_max} \geq D \end{cases} \quad (5)$$

На рисунках 1 и 2 пунктирной линией приведены графики зависимости от расстояния относительного снижения максимальной дальности действия БРЛС в условиях с осадками заданной интенсивности $r_{п_max}$ при их локализованном характере в соответствии с (4) к максимальной дальности действия БРЛС в условиях без осадков r_{a_max} для частот 3 ГГц и 9,4 ГГц для горизонтальной и вертикальной поляризации. Из рисунка 1 следует, что влиянием осадков при их локализованном характере в диапазоне 3 ГГц можно пренебречь, т. к. разница при этом составляет менее 1 %. В остальных случаях разница является существенной, и это необходимо учитывать при проведении испытаний. При действии осадков на протяжении всей дальности действия БРЛС их учет необходимо производить путем получения экспериментальных результатов в условиях без осадков с последующим пересчетом в соответствии с графиками на рисунках 1 и 2. При этом, однако, существует проблема, связанная с тем, что, если в условиях с осадками граничная дальность БРЛС заявлена близкой к радиогоризонту, то в условиях без осадков граничная дальность действия может оказаться за пределами радиогоризонта, и ее определение посредством натуральных испытаний не представляется возможным.

Для решения этой проблемы предлагается использование эталонной цели с уменьшенным значением эффективной площади рассеяния (ЭПР). Возможность предлагаемого варианта определения дальности действия БРЛС при осадках вытекает из основного уравнения радиолокации, один из вариантов которого имеет вид:

$$r_{0_max} = \sqrt[4]{\frac{P_{и} \cdot G_{max}^2 \cdot \sigma_{ц} \cdot \lambda^2}{P_{пр.min} \cdot (4\pi)^3}} \quad (6)$$

где

$P_{и}$ — излучаемая мощность в импульсе (Вт);

G_{max} — коэффициент усиления антенны, включая КПД приемно-передающего тракта;

$P_{пр.min}$ — чувствительность приемника БРЛС (Вт);

λ — длина волны излучения (м);

$\sigma_{ц}$ — заданная ЭПР цели (м²).

Учитывая, что в формуле (6) ЭПР цели $\sigma_{ц}$ стоит под корнем 4-й степени, учет осадков можно произвести уменьшением ЭПР в соответствии с формулой:

$$\sigma'_{ц} = \sigma_{ц} \cdot 10^{-0,2 \cdot \gamma_{RD} \cdot \Delta r}. \quad (7)$$

Определив в процессе проведения испытаний дальность действия БРЛС без учета осадков (r_{0_max}) с ЭПР цели уменьшенного значения, определенной в соответствии с (7), дальность действия БРЛС в условиях осадков (r'_{0_max}) можно определить с помощью следующей формулы:

$$r'_{0_max} = r_{0_max} \cdot \sqrt[4]{\sigma'_c / \sigma_c}. \quad (8)$$

Таким образом, определяется возможность проведения испытаний по определению дальности действия БРЛС с учетом осадков заданной интенсивности на основе испытаний, проведенных в условиях без осадков.

Существует, однако, вероятность, что энергетический потенциал БРЛС настолько велик, что, даже при уменьшенной в соответствии с (7) ЭПР цели, не удастся определить дальность действия БРЛС без учета осадков, т. к. она ограничивается дальностью радиогоризонта. Следовательно, существует ограничение на максимальное значение ЭПР цели, которое определяется энергетическим потенциалом ЭПР и дальностью радиогоризонта.

На рисунке 3 приведены графики зависимости требуемого значения ЭПР цели для обеспечения заданной дальности обнаружения БРЛС «Наяда 5», работающей на частоте 9410 МГц, для типовых значений ее параметров.

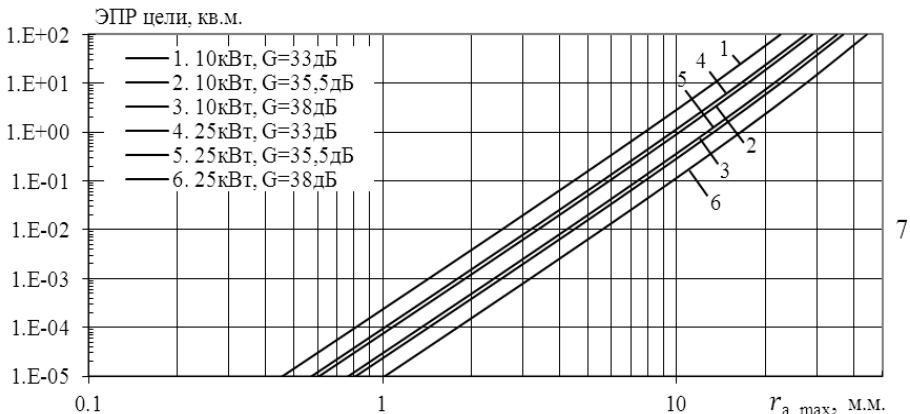


Рис. 3. Зависимость требуемого значения ЭПР цели для обеспечения заданной дальности обнаружения БРЛС «Наяда 5» для типовых значений ее параметров.

Fig. 3. Dependence of the required value of the RCS of the target to ensure a given detection range of the “Nayada 5” radar for typical values of its parameters

Таким образом, для определения максимального значения ЭПР цели предварительно необходимо вычислить дальность радиогоризонта R для БРЛС, которая в морских милях (м.м) определяется формулой:

$$R = 2,23(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (9)$$

где h_1 — высота установки антенны БРЛС (м);
 h_2 — высота центра ЭПР над уровнем моря (м).

Затем с помощью соответствующего графика, приведенного на рисунке 3 для максимальной дальности обнаружения БРЛС примерно вдвое меньше дальности радиогоризонта, определенного по (9), определить максимально допустимую ЭПР испытательной цели.

С другой стороны существуют ограничения на минимальные пределы значений ЭПР испытательной цели, определяемые влиянием отражений зондирующего сигнала БРЛС от морской поверхности. В общем случае сигнал, отраженный от морской поверхности, описывается в терминах удельной ЭПР (УЭПР) σ_0 и зависит от угла скольжения, от рассеяния электромагнитных волн на крупных и мелких неровностях и от наличия отражения волн от облака брызг и пенных образований. При этом существуют эмпирические формулы, учитывающие скорость ветра и его направление, поляризацию, частоту сигнала и т. д. [1]. Однако в первом приближении можно использовать зависимости для усредненного моря в виде графиков зависимости УЭПР σ_0 от скорости ветра для вертикальной поляризации сигнала, приведенные в [2]. Сопоставляя приведенные в [1] значения скорости ветра, при которых приведены графики с параметром волнения моря в баллах, и учитывая, что интерес представляют значения угла падения радиоволн на морскую поверхность, близкие к 80—90 градусам, УЭПР моря для частоты 9,4 ГГц можно представить, как показано в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость УЭПР от скорости ветра для частоты 9,4 ГГц.

Table 2. Dependence of the unit RCS on wind speed for a frequency of 9.4 GHz

Скорость ветра, м/с	≤ 2,5	2,5—5	5—7,5	7,5—10
Соответствие скорости ветра волнению моря по шкале Бофорта, баллы	2	3	4	5
УЭПР σ_0 , дБ	−40	−39	−36	−34

ЭПР участка морской поверхности является произведением УЭПР на площадь участка поверхности S , облучаемого радиоимпульсом, которая зависит от расстояния между БРЛС и участком S , а также от разрешающей способности станции по азимуту ($\Delta\alpha$) и по расстоянию (ΔR):

$$\sigma_{\text{м.п.}} = \sigma_0 \pi ((R + 0,5\Delta R)^2 - (R - 0,5\Delta R)^2) \Delta\alpha / 360 \quad (10)$$

На рисунке 4 приведены графики зависимости значения ЭПР облучаемой поверхности от расстояния до этой поверхности для различных значений волнения морской поверхности.

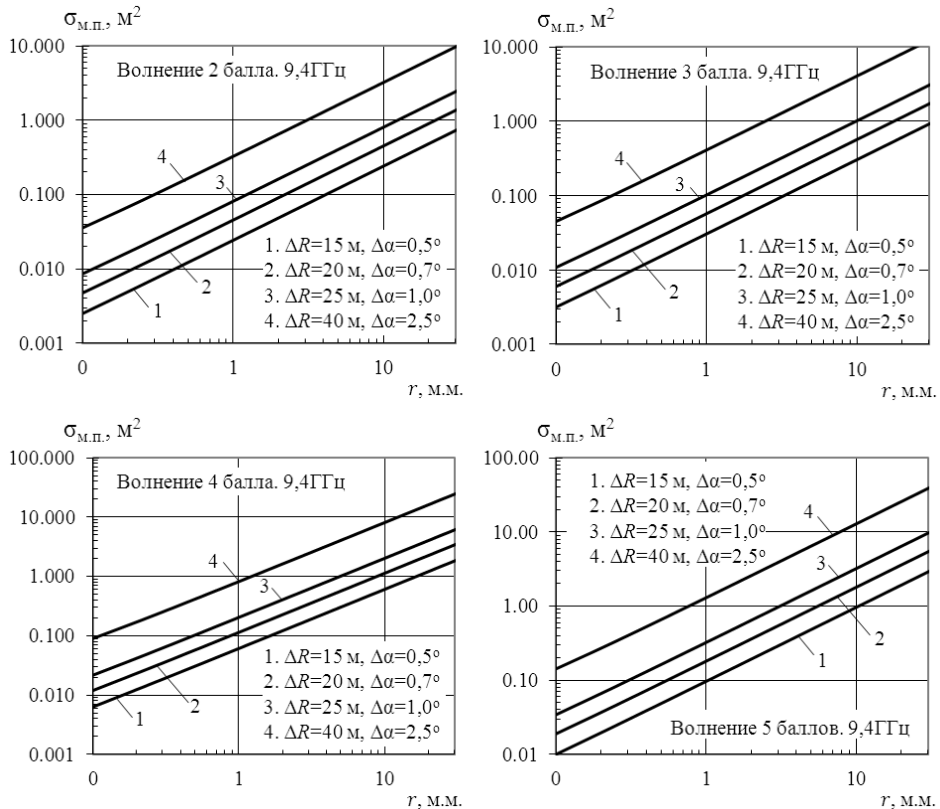


Рис. 4. Зависимости значения ЭПР облучаемой поверхности от расстояния до этой поверхности для различных значений волнения морской поверхности.

Fig. 4. Dependences of the RCS value of the irradiated surface on the distance to this surface for various sea surface waves

3. Заключение

Рассмотренный опытно-теоретический метод проведения испытаний БРЛС, использующий понятие энергетического потенциала станции и испытательной цели уменьшенной ЭПР, позволяет учесть влияние осадков заданной интенсивности на основе результатов испытаний, проведенных в условиях отсутствия осадков. Рассмотрены ограничения при выборе ЭПР испытательной цели как по верхнему пределу, обусловленному техническими параметрами испытываемой БРЛС и дальностью радиогоризонта, так и по нижнему пределу, обусловленному волнением моря и отражениями зондирующего сигнала от морской поверхности.

Список литературы

1. Мур Р. К., Фэн А. К. Радиолокационные определения параметров ветра над морем // ТИИЭР. 1979. Том 67, № 11. С. 40—63.
2. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. Том 1. Основы радиолокации / под ред. Я. С. Ицхоки. М. : Сов. радио, 1976. 456 с.

Информация об авторах

Громоздин Валентин Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные и телекоммуникационные технологии» Севастопольского государственного университета, заместитель директора филиала по техническому развитию Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

Иевлев Константин Владимирович, аспирант кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» Севастопольского государственного университета, инженер 1-й категории НТО МиА Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

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

Новикова Татьяна Викторовна, доцент кафедры «Инновационные и телекоммуникационные технологии» Севастопольского государственного университета, заместитель начальника НТО МК Севастопольского испытательного центра «Омега» — филиала ФГУП НИИР, Российская Федерация.

Method for Determining the Range of a Coastal Radar Station

V. V. Gromozdin, K. V. Ievlev, M. S. Kozub, and T. V. Novikova

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

Received: April 19, 2022
Peer-reviewed: June 5, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract: The paper considers an experimental-theoretical method for testing a coastal radar station using a test target with a reduced effective scattering surface (ESR), which makes it possible to take into account the effect of precipitation of varying intensity when testing in conditions of lack of precipitation. The limitations are considered when choosing the ESR of a test target both along the upper limit, due to the technical parameters of the tested radar and the range of the radio horizon, and along the lower limit, due to sea waves and reflections from the sea surface.

Keywords: Vessel Traffic Services, coastal radar station, effective scattering surface, range, energy potential, precipitation intensity.

For citation (IEEE): V. V. Gromozdin, K. V. Ievlev, M. S. Kozub, and T. V. Novikova, “Method for Determining the Range of a Coastal Radar Station,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 236–246, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.17. (In Russ.).

References

- [1] R. K. Moore and A. K. Fung, “Radar determination of winds at sea,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1504–1521, 1979, doi: 10.1109/proc.1979.11510.
- [2] *Radar Handbook*, M. I. Skolnik, ed. in chief. The McGraw-Hill Co., 1970.

Information about the authors

Valentin V. Gromozdin, C.Sc., Associate professor of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University, Deputy Director for Technical Development of the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.

Konstantin V. Ievlev, graduate student of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University, Engineer of the scientific and technical dept. of marine and aviation equipment of the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.

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

Tatyana V. Novikova, C.Sc., Associate professor of the dept. of Innovative and Telecommunication Technologies of the Sevastopol State University, Deputy Head of the scientific and technical dept. of quality management of the Sevastopol branch of FSUE NIIR “Omega Testing Center”, Russian Federation.

УДК 621.372.85

Моделирование коаксиально-волноводного перехода в программном пакете ANSYS HFSS

Широков И. Б., Евдокимов П. А., Соколова М. И.

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

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В рамках данной работы описан процесс проектирования коаксиально-волноводного перехода, необходимого для соединения волноводного тракта с электронной частью устройства контроля изменения состава воздушной среды. Представлены результаты моделирования коаксиально-волноводного перехода в программном пакете ANSYS HFSS. Полученные в результате моделирования значения КСВН для поставленной задачи являются оптимальным.

Ключевые слова: коаксиально-волноводный переход, микроволновые колебания, метод конечных элементов, КСВН, ANSYS HFSS.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Евдокимов П. А., Соколова М. И. Моделирование коаксиально-волноводного перехода в программном пакете ANSYS HFSS // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 247—252.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Широков, И. Б. Моделирование коаксиально-волноводного перехода в программном пакете ANSYS HFSS / И. Б. Широков, П. А. Евдокимов, М. И. Соколова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 247—252.

1. Введение

Задача по проектированию коаксиально-волноводного перехода (КВП) является частью проекта по разработке измерительного устройства контроля изменения состава воздушной среды [1—2].

Рабочая частота микроволнового измерительного канала равна 9,4 ГГц. В соответствии с рабочей частотой волноводный тракт устройства реализован на прямоугольных волноводах сечением 23×10 мм.

В рамках данной работы описан процесс проектирования коаксиально-волноводного перехода, необходимого для соединения волноводного тракта с электронной частью устройства, реализованной на печатных платах.

2. Моделирование коаксиально-волноводного перехода в программном пакете *ANSYS HFSS*

Анализ структуры разрабатываемого коаксиально-волноводного перехода осуществлялся при помощи метода конечных элементов в программном пакете *ANSYS HFSS*.

Модель разработанного коаксиально-волноводного перехода представлена на рис. 1.

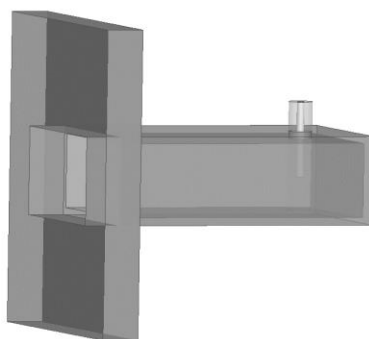


Рис. 1. Модель разработанного коаксиально-волноводного перехода.

Fig. 1. The model of the developed coaxial-waveguide transition

Разбиение модели коаксиально-волноводного перехода на конечные элементы (тетраэдры) представлено на рис. 2.

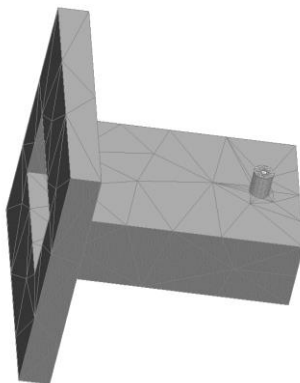


Рис. 2. Модель коаксиально-волноводного перехода, разделенная тетраэдральной сеткой.

Fig. 2. The division of the model of a coaxial-waveguide transition into finite elements (tetrahedra)

Функции статистики программного пакета *HFSS* позволяют оценить необходимое количество конечных элементов для решения задачи. Согласно отчету о решении задачи тетраэдральная сетка модели КВП состоит из 11796 элементов.

КВП представляет собой серебряный штырь диаметром $d=1\text{мм}$, который находится внутри фторопластового стрежня диаметром D , проходящего параллельно узкой стенке прямоугольного волновода.

Диаметр D фторопластового стрежня можно определить через волновое сопротивление коаксиальной линии Z_0 согласно следующему выражению:

$$Z_0 = \frac{60 \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{\sqrt{\varepsilon_f}}, \quad (1)$$

где ε_f — относительная диэлектрическая проницаемость фторопласта [3].

Выражая D из формулы (1), получим следующее соотношение:

$$D = d \times e^{\frac{Z_0 \sqrt{\varepsilon_f}}{60}}, \quad (2)$$

подставив значения $\varepsilon_f = 2$ и $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ получим $D = 3,25 \text{ мм}$.

Расположение штыря и его длину в волноводе определена при помощи численной оптимизации в *ANSYS HFSS*.

Линейные размеры КВП обозначены на рис. 3.

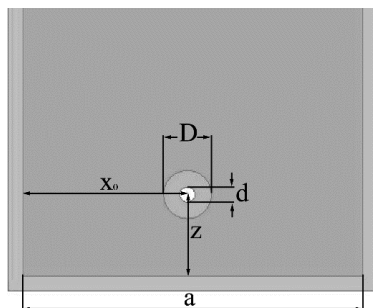


Рис. 3. Линейные размеры коаксиально-волноводного перехода.

Fig. 3. The linear dimensions of the coaxial-waveguide transition

Размер широкой стенки волновода $a=23\text{мм}$, расстояние от центра штыря до закорачивающей стенки волновода $z=5,53\text{мм}$. Расстояние от центра штыря до боковой стенки $x_0=11,13\text{мм}$, а длина штыря в волноводе $l=5,17\text{мм}$.

График КСВН, полученный в результате моделирования, представлен на рис. 4.

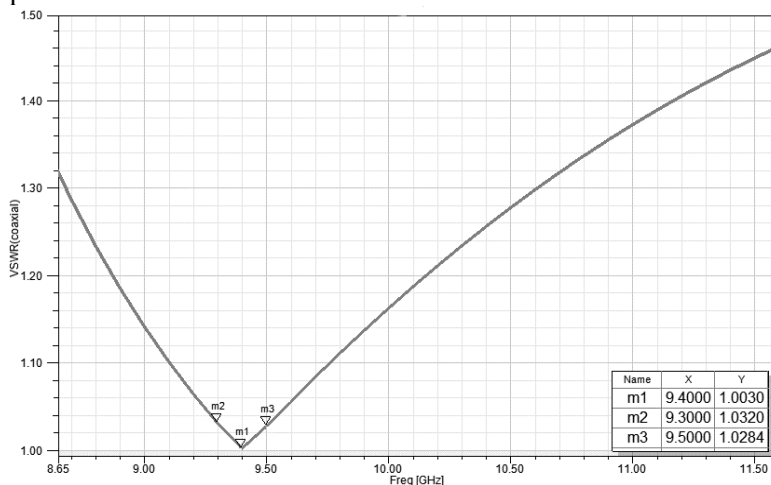


Рис. 4. График КСВН.

Fig. 4. The VSWR graph

3. Заключение

В работе представлены результаты моделирования коаксиально-волноводного перехода в программном пакете *ANSYS HFSS*. Полученное значение КСВН на центральной частоте 9,4 ГГц составило 1,003, а на частотах 9,3 ГГц и 9,5 ГГц величина КСВН соответственно равна 1,032 и 1,0284. Полученные в результате моделирования значения КСВН для поставленной задачи являются оптимальным.

Также стоит отметить, что функция численной оптимизации в программном пакете *ANSYS HFSS* значительно упрощает процесс определения длины и расположения возбуждающего штыря в КВП.

Список литературы

- 1 Экологический контроль атмосферы вблизи транспортных магистралей и промышленных предприятий городов / П. А. Евдокимов, Е. И. Широкова, М. И. Соколова, И. Б. Широков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 392—393.
- 2 Контроль содержания вредоносных газов в воздухе с использованием микроволнового канала связи / И. Б. Широков, П. А. Евдокимов, Е. И. Широкова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 389—398.
- 3 Лосев И. Я., Тростянская Е. Б. Химия синтетических полимеров. Изд. 3-е. М. : Химия, 1971. 615 с.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Евдокимов Павел Алексеевич, студент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Соколова Мария Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Modeling a Coaxial-Waveguide Transition in the ANSYS HFSS Software Package

I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and M. I. Sokolova

Sevastopol State University

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

shirokov@ieee.org

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Within the framework of this work, the process of designing a coaxial-waveguide transition necessary for connecting the waveguide path with the electronic part of the device for controlling changes in the composition of the air environment is described. The results of modeling a coaxial-waveguide transition in the ANSYS HFSS software package are presented. The value of VSWR obtained as a result of modeling for the task is optimal.

Keywords: coaxial-waveguide transition, microwave oscillations, finite element method, VSWR, ANSYS HFSS.

For citation (IEEE): I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and M. I. Sokolova, "Modeling a Coaxial-Waveguide Transition in the ANSYS HFSS Software Package," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 247–252, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.18. (In Russ.).

References

- [1] P. A. Evdokimov, E. I. Shirokova, M. I. Sokolova, and I. B. Shirokov, "Ecological control of the atmosphere near transport highways and industrial enterprises of cities," *Microwave and Telecommunication Technology*, no. 1–2, pp. 392–393, 2020. (In Russ.).
- [2] I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and E. I. Shirokova, "Monitoring the content of harmful gases in the air using a microwave communication channel," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 389–398, 2020. (In Russ.).
- [3] I. Ya. Losev and Ye. B. Trostyanskaya, *Chemistry of synthetic polymers*. Moscow: Khimiya, 1971. (In Russ.).

Information about the authors

Igor B. Shirokov, Professor of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

Pavel A. Evdokimov, student of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

Maria I. Sokolova, student of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.391

Метод синтеза согласованного фильтра для условий белого шума и негауссовских помех

Дегтярёв А. Н., Кожемякин А. С.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053., Российская Федерация

Degtyaryov1966@yandex.ru

Получено: 16 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: *Предлагается метод синтеза согласованного фильтра для условий одновременного действия белого шума и негауссовских помех. Метод основан на представлении согласованного фильтра в виде линейной системы, реализующей интегральное преобразование с вещественным ядром. Шум, негауссовская помеха и сигнал считаются ограниченными по частоте. Определяется отношение сигнал-шум в отсчетный момент времени. Разложение корреляционной функции помехи и сигнала в ряд по функциям отсчетов и полученное отношение сигнал-шум дают уравнение, позволяющее определить сигналы, максимизирующие отношение сигнал-шум.*

Ключевые слова: *отношение сигнал-шум, согласованный фильтр, корреляционная функция, белый гауссовский шум, негауссовская помеха, интегральное преобразование.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дегтярёв А. Н., Кожемякин А. С. Метод синтеза согласованного фильтра для условий белого шума и негауссовских помех // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 253—259.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Дегтярёв, А. Н. Метод синтеза согласованного фильтра для условий белого шума и негауссовских помех / А. Н. Дегтярёв, А. С. Кожемякин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 253—259.

1. Введение

Известно, что повышение отношения сигнал-шум на входе решающего устройства радиотехнической системы, построенной по какому-либо критерию, могут обеспечить согласованный фильтр или коррелятор [1].

При этом характеристики указанных устройств связаны с формой сигнала, с которым они согласованы. В случае, когда на входе приемника действует аддитивная смесь сигнала и белого гауссовского шума отношение сигнал-шум зависит только от энергии сигнала и спектральной плотности мощности шума, и не зависит от формы сигнала. Если шум на входе приемника является суммой белого гауссовского шума и некоторой негауссовской помехи, то для повышения отношения сигнал-шум используют каскадно включенные обесцвечивающий фильтр и фильтр, согласованный с полезным сигналом, снимаемым с выхода обесцвечивающего фильтра [1]. Помехоустойчивость системы возрастает за счет того, что спектральные составляющие сигнала, не пораженные помехой, усиливаются [1]. В данном случае для повышения отношения сигнал-шум учитывается форма сигнала.

Однако при чрезмерном усилении таких спектральных составляющих возможны нелинейные искажения сигнала, приводящие к снижению помехоустойчивости приемника. Кроме того, использование пары фильтров вместо одного согласованного фильтра усложняет приемник.

Целесообразно разработать метод синтеза пары: сигнал — согласованный с ним фильтр, который позволяет исключить использование обесцвечивающего фильтра.

2. Теория

Пусть на вход согласованного фильтра поступает аддитивная смесь полезного сигнала $s(t)$, ограниченного по частоте верхней частотой f_m , и реализации помехи $n(t)$, которая имеет корреляционную функцию $B_n(t, \tau)$

$$z(t) = s(t) + n(t)$$

Будем рассматривать согласованный фильтр в виде линейного устройства, реализующего интегральное преобразование

$$x(\tilde{t}) = \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) z(t) dt,$$

где $R(t, \tilde{t})$ — ядро интегрального преобразования, t_0 — время наблюдения сигнала.

Выходной сигнал $x(\tilde{t})$ имеет вид

$$x(\tilde{t}) = \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) z(t) d\tau = \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) [s(t) + n(t)] dt.$$

Математическое ожидание процесса $x(\tilde{t})$ с учетом нулевого математического ожидания помехи $n(t)$ равно:

$$m_x(\tilde{t}) = M \left\{ \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) [s(t) + u(t)] dt \right\} = \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) s(t) dt. \quad (1)$$

Поскольку решение о приеме сигнала $s(t)$ принимается в момент времени t_0 , то при $\tilde{t} = t_0$, имеем

$$m_x(t_0) = \int_0^{t_0} R(t, t_0) s(t) dt. \quad (2)$$

Используя неравенство Буняковского — Шварца, из (2) получаем

$$m_x(t_0) \leq \int_0^{t_0} R(t, t_0) s(t) dt = \sqrt{\int_0^{t_0} R^2(t, t_0) dt \int_0^{t_0} s^2(t) dt}.$$

Равенство в этой формуле возможно, если

$$R(t, t_0) = cs(t), \quad (3)$$

где c — положительная константна.

Дисперсия процесса $x(\tilde{t})$ имеет вид

$$D_x(\tilde{t}) = M \{ x^2(\tilde{t}) - m_x^2(\tilde{t}) \}.$$

Вычислим $M \{ x^2(\tilde{t}) \}$:

$$\begin{aligned} M \{ x^2(\tilde{t}) \} &= M \left\{ \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) [s(t) + n(t)] dt \int_0^{t_0} R(\tau, \tilde{t}) [s(\tau) + n(\tau)] d\tau \right\} = \\ &= M \left\{ \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) R(\tau, \tilde{t}) [s(t)s(\tau) + s(t)n(\tau) + n(t)s(\tau) + n(t)n(\tau)] dt d\tau \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Используем линейность операций интегрирования и взятия математического ожидания, а также тот факт, что $M \{ n(t) \} = 0$, и получим

$$\begin{aligned} M \{ x^2(\tilde{t}) \} &= \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) R(\tau, \tilde{t}) [s(t)s(\tau) + B_n(t, \tau)] dt d\tau = \\ &= \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) R(\tau, \tilde{t}) s(t)s(\tau) dt d\tau + \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) R(\tau, \tilde{t}) B_n(t, \tau) dt d\tau. \end{aligned} \quad (5)$$

Преобразуем первое слагаемое равенства (5) и получаем

$$M \{ x^2(\tilde{t}) \} = \left[\int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) s(t) dt \right]^2 + \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) R(\tau, \tilde{t}) B_n(t, \tau) dt d\tau.$$

Таким образом, с учетом (1) и (5), дисперсия процесса $x(\tilde{t})$ равна

$$D_x(\tilde{t}) = \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} R(t, \tilde{t}) R(\tau, \tilde{t}) B_n(t, \tau) dt d\tau$$

и в момент принятия решения составляет

$$D_x(t_0) = \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} R(t, t_0) R(\tau, t_0) B_n(t, \tau) dt d\tau.$$

Учтем выражение (3) и получим

$$D_x(t_0) = \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} c^2 s(t) s(\tau) B_n(t, \tau) dt d\tau.$$

Отношение сигнал-шум на выходе согласованного фильтра в момент принятия решения ($\tilde{t} = t_0$) записывается как

$$h(t_0) = \frac{\int_0^{t_0} s^2(t) dt}{\sqrt{\int_0^{t_0} \int_0^{t_0} s(t) s(\tau) B_n(t, \tau) dt d\tau}} = \frac{E_s}{\sqrt{\int_0^{t_0} \int_0^{t_0} s(t) s(\tau) B_n(t, \tau) dt d\tau}}, \quad (6)$$

где E_s — энергия $s(t)$.

Выражение (6) описывает отношение сигнал-шум на выходе согласованного с сигналом $s(t)$ фильтра при поступлении на его вход аддитивной смеси сигнала $s(t)$ и реализации помехи $n(t)$ с корреляционной функцией $B_n(t, \tau)$.

Отметим, что если $n(t)$ — реализация дельта-коррелированного белого шума со спектральной плотностью мощности $N_0/2$, то

$$B_n(t, \tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau - t).$$

Тогда

$$h(t_0) = \frac{E_s}{\sqrt{\int_0^{t_0} \int_0^{t_0} s(t) s(\tau) \frac{N_0}{2} \delta(\tau - t) d\tau dt}}.$$

Откуда, с учетом фильтрующего свойства δ -функции, имеем

$$h(t_0) = \frac{E_s}{\sqrt{\frac{N_0}{2} \int_0^{t_0} s^2(\tau) d\tau}} = \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}.$$

что не противоречит известному факту.

Поскольку сигнал $s(t)$ ограничен по частоте, то на основании теоремы В. А. Котельникова его можно разложить в ряд по функциям отсчетов

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \varphi_n(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{n}{2f_m}\right) \frac{\sin 2\pi f_m \left(t - \frac{n}{2f_m}\right)}{2\pi f_m \left(t - \frac{n}{2f_m}\right)}. \quad (7)$$

Поскольку помеха рассматривается в частотной полосе существования сигнала, то корреляционная функция помехи также раскладывается в ряд по функциям отсчетов

$$B_n(t, \tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} k_{km} \varphi_k(t) \varphi_m(\tau), \quad (8)$$

где

$$k_{km} = \int_{-t_0}^{t_0} \int_{-t_0}^{t_0} B_n(t, \tau) \varphi_k(t) \varphi_m(\tau) dt d\tau.$$

Подставим выражения (7) и (8) в формулу (6) и получим

$$h(t_0) = \frac{\int_0^{t_0} s^2(t) dt}{\sqrt{\int_0^{t_0} \int_0^{t_0} s(t) s(\tau) B_n(t, \tau) dt d\tau}} = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n^2}{\sqrt{\int_0^{t_0} \int_0^{t_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \varphi_k(t) \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_l \varphi_l(\tau) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} k_{nm} \varphi_n(t) \varphi_m(\tau) dt d\tau}} \quad (9)$$

Учтем ортогональность функций отсчетов и после преобразования выражения (21) получим

$$h(t_0) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n^2}{\sqrt{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} k_{nm} a_n a_m}}. \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет синтезировать сигналы, которые максимизируют отношение сигнал-шум при заданной корреляционной функции помехи.

Задача синтеза сигналов сводится к определению коэффициентов a_n , которые обращают в максимум отношение сигнал-шум (10).

Система уравнений для вычисления требуемых коэффициентов a_n может быть получена из условий

$$\frac{dh(t_0)}{da_i} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{d^2 h(t_0)}{da_i^2} < 0. \quad (12)$$

Приравнивание к нулю первой производной (11) дает систему уравнений относительно a_i вида

$$4a_i \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} k_{nm} a_n a_m - \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n^2 \left(\sum_{m=-\infty}^{\infty} k_{im} a_m + \sum_{k=-\infty}^{\infty} k_{ki} a_k \right) = 0. \quad (13)$$

Если полученные значения a_i обращают в истинное выражение неравенство (24), то эти значения и есть решение задачи.

Очевидно, что при решении уравнений (13) необходимо задавать конечные пределы суммирования, которые ограничиваются допустимой погрешностью аппроксимации корреляционной функции помехи.

3. Заключение

В случае, когда на входе приемника действует аддитивная смесь сигнала, белого шума и негауссовской помехи, обеляющий фильтр можно не использовать. Однако, при синтезе согласованного фильтра необходимо учитывать форму сигнала. Поскольку импульсная характеристика согласованного фильтра определяется сигналом, то для максимизации отношения сигнал-шум необходимо синтезировать сигнал. Синтез сигнала возможен, если известна корреляционная функция негауссовской помехи. Поскольку сигнал и негауссовская помеха ограничены по частоте, то сигнал и корреляционная функция помехи раскладываются в ряд по функциям отсчетов на основании теоремы В. А. Котельникова. Подстановка в полученную формулу для отношения сигнал-шум указанных рядов дает выражение, зависящее от неизвестных отсчетов сигнала и известных отсчетов корреляционной функции негауссовской помехи. Задача синтеза сигнала, а, соответственно, и согласованного с ним фильтра, состоит в определении отсчетов сигнала, максимизирующих полученное отношение сигнал-шум.

Такой подход к повышению помехоустойчивости радиотехнической системы позволяет не подключать обеляющий фильтр ко входу согласованного фильтра.

Список литературы

1. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва : Дрофа, 2006. 719 с.

Информация об авторах

Дегтярёв Александр Николаевич, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Кожемякин Александр Сергеевич, младший научный сотрудник Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Matched Filter Design Method for White Noise and Non-Gaussian Noise Conditions

A. N. Degtyaryov and A. S. Kozhemyakin

Sevastopol State University
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russian Federation
Degtyaryov1966@yandex.ru

Received: May 16, 2022
Peer-reviewed: June 5, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract: A method for synthesizing a matched filter for conditions of simultaneous action of white noise and non-Gaussian noise is proposed. The method is based on the representation of the matched filter as a linear system that implements an integral transformation with a real kernel. Noise, non-Gaussian noise and signal are considered to be frequency limited. The signal-to-noise ratio at the reference point in time is determined. The expansion of the correlation function of the interference and the signal into a series of count functions and the resulting signal-to-noise ratio give an equation that allows one to determine the signals that maximize the signal-to-noise ratio.

Keywords: signal-to-noise ratio, matched filter, correlation function, white Gaussian noise, non-Gaussian interference, integral transform.

For citation (IEEE): A. N. Degtyaryov and A. S. Kozhemyakin, "Matched Filter Design Method for White Noise and Non-Gaussian Noise Conditions," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 253–259, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.19. (In Russ.).

References

- [1] I. S. Gonorovsky, *Radio engineering circuits and signals*, Moscow: Drofa, 2006. (In Russ.).

Information about the authors

Alexander N. Degtyaryov, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Alexander S. Kozhemyakin, junior researcher, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Рассмотрены научные пути, которые привели американского радиотехника Майкла Пупина к разработкам телефонных технологий, направленных на повышение качества звукового сигнала при его передаче на большие расстояния. Исследованы важные изобретения Пупина в области дальней телефонии. Описаны его теории использования катушек индуктивности для уменьшения затухания передаваемого телеграфного и телефонного сигнала по кабелю путем искусственного увеличения его индуктивности. Уделено внимание спору между Пупином и Кэмпбеллом в первенстве изобретения нагрузочных катушек и его наиболее значимым последствиям.

Ключевые слова: дальняя телефонная связь, Майкл Пупин, Лагранж, аналитическая механика, нагруженный проводник, пупинизация, патентное соперничество Пупина и Кэмпбелла.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 260—293.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 260—293.

1. Введение

В статье [1] рассмотрены и проанализированы телефонные технологии, которые позволили решить некоторые проблемы дальней телефонии на рубеже 19 и 20 веков. Одной из самых важных инноваций в истории телефонной связи стала практическая реализация сотрудником компании

AT&T Дж. Кэмпбеллом концепции Оливера Хевисайда об увеличении индуктивности линии. Это нововведение устранило временные задержки и искажения сигнала, позволив значительно повысить скорость передачи. Дж. Кэмпбелл продемонстрировал, что телефонная линия передачи, нагруженная катушками индуктивности, может передавать четкие голосовые сигналы в два раза дальше, чем ненагруженные линии. Это привело к значительной экономии средств по сравнению с существующей технологией покрытой железом медной проволоки. Родилась нагрузочная катушка, которая названа так потому, что катушка «нагружала» цепь индуктивностью.

В данной статье рассматривается решение проблемы увеличения дальности передачи телеграфных и телефонных сообщений по кабелям связи, которая находилась в числе приоритетных научных исследований не только в *Bell Co.*, но и в других научных центрах, в частности, американском Колумбийском университете. Здесь этими вопросами занимался возвратившийся из-за границы в родные стены выпускник университета Майкл Пупин¹ (*Michael Idvorski Pupin*, 09.10.1858—12.03.1935). В 1883 году он окончил колледж Колумбия² и получил степень бакалавра гуманитарных наук (*Bachelor of Arts*), а в июне месяце того же года отправился продолжать свое образование в Кембридж. В Кембридже Пупин для продолжения образования выбрал Королевский колледж (англ. *King's College*). Здесь он провел 18 месяцев в изучении вопросов математической физики и подготовке с репетитором к сдаче экзамена трайпос³ по математике. Неизвестно, сдал он этот экзамен или нет (таких данных в научной литературе найти не удалось).

2. Книга, перевернувшая научное мировоззрение М. Пупина

В 1884 году Пупин провел 2-х месячные каникулы во Франции в небольшом городке Порник (*Pornic*) на побережье Бискайского залива. 15 июля он «посетил великую Сорбонну и Колледж де Франс в Латинском квартале», где, по его словам, «нашел великое сокровище в букинистиче-

¹ М. Пупин родился в Сербии, селе Идвор, в 54 км от Белграда. В 1874 г. подростком, после смерти отца, эмигрировал в Америку.

² Колледж был образован в 1754 году, с 1784 г. по 1896 г. назывался колледж Колумбия. В 1896 году по разрешению попечителей официально стал называться — «университет Колумбия» (англ. *Columbia University*). Сегодня университет официально именуется «университет Колумбия в городе Нью-Йорк» в районе Манхэттен или просто Колумбия (англ. *Columbia*).

³ Трайпос (англ. *Tripes*) — традиционный выпускной письменный экзамен по курсу математики студентов бакалавриата Кембриджского университета. Сами экзамены были отчасти задуманы как испытания на выносливость и проводились в течение четырех или пяти дней.

ском магазине: великий трактат Лагранжа «Аналитическая механика»⁴ [2, 3], впервые опубликованный под эгидой Французской академии в 1788 году, рис. 1. В книге мемуаров⁵ Пупин отметил [3, р. 189]: «Мое двухмесячное пребывание в Порнике позволило мне в полной мере оценить красоту языка этой великой работы, а мое обучение у Раута⁶ устранило многие трудности математической теории. Я убедился в этом в своих самых первых попытках в Париже расшифровать некоторые из его вдохновляющих страниц». Книга, купленная в Париже, содержала статью Лагранжа «Исследования природы и распространения звука» (фр. *Researches sur la Nature et la Propagation du Son*), в которой было дано решение проблемы вибрирующей струны с закрепленными концами и нагруженной через равные промежутки времени одинаковыми массами.

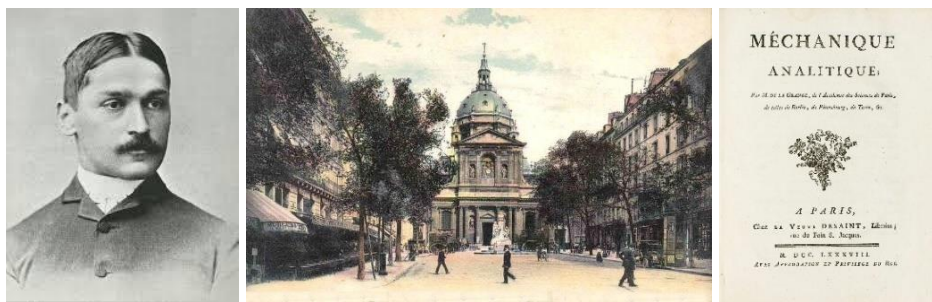


Рис. 1. Майкл Пупин. Парижский университет 1 Пантеон-Сорбонна (19 век).
Трактат Жозефа Луи Лагранжа «Аналитическая механика»,
опубликованный в Париже в 1788 г.

Fig. 1. Michael Pupin. University of Paris 1 Pantheon-Sorbonne (19th Century).
Joseph Louis Lagrange's treatise "Analytical Mechanics", published in Paris in 1788

Здесь уместно дать небольшой комментарий по поводу статьи Лагранжа, которая в дальнейшем сыграла большую роль в решении Пупином

⁴ Лагранж рассматривает всю механику, статическую и динамическую, не прибегая к каким-либо описательным средствам или фигурам, благодаря единственному формализму аналитического исчисления.

⁵ В 1923 г. Майкл Пупин издал книгу мемуаров «От иммигранта к изобретателю» (англ. *From Immigrant to Inventor*). В 1924 г. за эту книгу ему была присуждена ежегодная Пулитцеровская премия (англ. *Pulitzer Prize*). Мемуары были опубликованы на сербском языке в 1929 году под названием «От пастбищ к ученым» (серб. *Od pašnjaka do naučenjaka*). Пулитцеровская премия за биографию — одна из семи американских Пулитцеровских премий, ежегодно присуждаемых в области литературы, драмы и музыки. Она вручается с 1917 года за выдающуюся биографию, автобиографию или мемуары американского автора или соавторов, опубликованные в течение предыдущего года.

⁶ Джон Эдвард Раут (*John Edward Routh*), сотрудник колледжа Питерхаус (*Peterhouse College*), был самым известным преподавателем математики, которого когда-либо видел Кембриджский университет. Занимался подготовкой студентов к сдаче трайпоса по математике.

проблемы дальней телефонной связи. Среди задач о колебания упругих тел особое место занимает задача о поперечных колебаниях натянутой струны конечной длины, закрепленной на обоих концах. В XVIII веке спор вокруг математической теории для исследования колебаний струны превратился в научную дискуссию, которая развернулась между крупнейшими учеными того времени, в частности, Д'Аламбером, Эйлером, Д. Бернулли, Лагранжем и другими. Эта задача сыграла важную роль в самой постановке вопроса о возможности тригонометрического разложения произвольной функции. Лагранж в отличие от названных ученых построил решение задачи несколько иначе, рассматривая движение каждой точки струны в отдельности. Для этого он закрепленную по концам нить разделил на n равных частей и загрузил их $n-1$ равными массами. Таким образом он свел задачу к решению системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка, которую решил по методу Д'Аламбера. Далее он перешел к задаче колебаний струны, рассматривая последнюю как предельный случай нагруженной невесомой нити при $n \rightarrow \infty$ и стремлении к нулю массы каждой части струны. При этом суммарная масса всех частей стремится к конечному пределу, то есть массе струны. Использование предельного перехода при $n \rightarrow \infty$ было лишено какой-либо математической строгости. Лагранж, невзирая на это, получил общее решение задачи колебаний струны с закрепленными концами, которое было аналогично результату Д. Бернулли в виде тригонометрического ряда. При этом Лагранж уточнил решение Д. Бернулли и вывел формулы для определения коэффициентов этого ряда. Это нашло отражение в «Аналитической механике» [4].

К концу каникул Пупин изучил большую часть классического трактата Лагранжа, и кроме этого, перечитал «Жизнь Максвелла» Льюиса Кэмпбелла и Уильяма Гарнетта (*Lewis Campbell and William Garnett*) [5] и понял многое из того, что видел в Кембридже, но не понимал раньше.

В конце 1844 года Пупин получил письмо от президента Колумбийского колледжа Барнарда (*Barnard*), к которому было приложено рекомендательное письмо к знаменитому физiku Джону Тиндалю⁷ (*John Tyndall*, 02.08.1820—04.12.1893), приемнику Фарадея в руководстве Королевским институтом (*Royal Institution*), рис. 2. Барнард сообщил, что Колумбия по-

⁷ Джон Тиндаль (англ. *John Tyndall*, 02.08.1820 — 04.12.1893) — английский физик. Выдающийся экспериментатор, в частности, в области физики атмосферы. Исследовал передачу как лучистого тепла, так и света через различные газы и пары. Обнаружил, что водяной пар и углекислый газ поглощают гораздо больше лучистого тепла, чем газы атмосферы, и доказал, что эти газы играют важную роль в смягчении климата Земли, то есть в естественном парниковом эффекте. Изучал рассеяние света крупными молекулами и пылью, известное как *эффект Тиндала*. Он провел эксперименты, демонстрирующие, что голубой цвет неба является результатом рассеяния солнечных лучей молекулами в атмосфере.

лучила щедрую сумму денег от Тиндаля, представляющую часть чистых поступлений от его знаменитого курса публичных лекций о свете, которые он читал в Соединенных Штатах в 1872—1873 годах и что доход от этой суммы будет предоставлен в качестве годовой стипендии \$500 выпускнику Колумбии для помощи в изучении экспериментальной физики. Подходящим кандидатом на стипендию Джона Тиндаля Барнард и профессор физики Колумбии Руд (*Rood*) сочли Пупина.



Рис. 2. Эксперимент Тиндаля с лучистым теплом (1870 г.). Майкл Фарадей с Томасом Генри Гексли, Чарльзом Уитстоном, Дейвидом Брюстером и Джоном Тиндалем (слева направо). Лекционный зал Королевского института (2013 г.), в котором Майкл Фарадей впервые продемонстрировал явление электромагнетизма.

Fig. 2. Tyndall's radiant heat experiment (1870). Michael Faraday with Thomas Henry Huxley, Charles Wheatstone, David Brewster and John Tyndall (from left to right). Royal Institution Lecture Hall (2013), where Michael Faraday first demonstrated the phenomenon of electromagnetism

Тиндаль поспособствовал Пупину в переезде из Кембриджа в Берлин и его занятиям в изучении экспериментальной физики в знаменитой лаборатории Гельмгольца. Напутствуя Пупина, Тиндаль сказал [3, р. 208]: «В Берлинской лаборатории вы найдете те самые вещи, которые мои американские и британские друзья и я хотели бы видеть в действии во всех лабораториях колледжей и университетов в Америке и в Британской империи. В этом отношении немцы лидируют в мире уже более сорока лет, и они являются великолепными лидерами».

В Берлинском университете Пупин пробыл 4 года, изучая в основном у Гельмгольца то, что тогда называлось «физической химией», а на самом деле являлось термодинамикой. В 1889 г. в Берлине Пупин защитил докторскую диссертацию (*PhD*) на тему «Осмотическое давление и его отношение к свободной энергии» (нем. *Der Osmotische Druck und seine Beziehung zur Freien Energie*) под руководством Германа Людвиг Фертманда фон Гельмгольца (*Hermann von Helmholtz*, 31.08.1821—08.09.1894). После защиты Пупин возвратился в Колумбийский университет и вошел в состав кафедры электротехники, которую организовал Фрэнсис Крокер

(Francis Bacon Crocker, 1897—1898) [6]. На кафедре было всего 2 человека, заведующий кафедрой профессор Крокер, который вел практические занятия по курсу электротехники, в то время как лекции по теоретической части этого курса читал профессор Пупин. Этот тендем начал свою педагогическую деятельность осенью 1889 года и гармонично работал в Колумбийском университете в течение двадцати лет. На протяжении этого периода Крокер⁸ был заведующим кафедрой.

3. Метод улучшения проводной телефонной линии

Пупин приступил к научным исследованиям, сразу после начала работы в Колумбийском университете. Он заинтересовался электрическим резонансом⁹ и электрическими токами в разреженных газах. Во время исследований низкочастотного электрического резонанса были открыты новые эффекты, которые он зафиксировал в патентной заявке «Устройство для телеграфирования и телефонирования» (англ. *Apparatus for Telegraphic or Telephonic Transmission*), поданной 14 декабря 1893 г. [7].

Предметом изобретения явилось устройство для преодоления импеданса¹⁰ (англ. *overcome the impedance*), которое электрические кабели, обладающие значительной самоиндукцией, электростатической емкостью и электростатическим поглощением, оказывают переменным, и особенно быстро меняющимся электрическим токам, а также для варьирования постоянной времени цепи. В патенте Пупин подчеркивает, что под «импедансом» он подразумевает не электромагнитное сопротивление, а комбинарованную реакцию омического сопротивления, самоиндукции, электростатического поглощения и ослабляющего эффекта распределенной емкости длинного кабеля. Под «постоянной времени» он имеет ввиду количество секунд, в течение которых электродвижущая сила практически завершает процесс заряда цепи.

Изобретение базируется на двух основных физических фактах, которые обнаружил его автор.

Первый физический факт. Каждая электрическая цепь ведет себя, исходя из своей самоиндукции и способности по отношению к периодиче-

⁸ Крокер до Колумбии основал несколько компаний по производству электродвигателей, в частности, *Curtis & Crocker and Crocker-Wheeler Electric Motor Company*. Работая в Колумбийском ун-те, он оказал значимое влияние на отрасль. По словам Томаса Эдисона, Крокер был «одним из ведущих инженеро-электриков мира, перед которым электротехническая промышленность в целом была в большом долгу».

⁹ Результатами этих исследований стали изобретения в области электрической настройки, которые после этого повсеместно стали применять в беспроводной телеграфии. Эти изобретения были запатентованы, и компания Маркони купила эти патенты в 1902 году.

¹⁰ Электрический импеданс — полное сопротивление двухполюсника для гармонического сигнала. Это понятие ввел О. Хевисайд в 1886 году.

ски изменяющейся электродвижущей силе, точно так же, как массивное упругое тело, вследствие своей инерции и упругости, ведет себя по отношению к периодически изменяющемуся возмущению. Подобно тому, как такое тело имеет определенный период колебаний, так и электрическая цепь имеет свой собственный определенный период, то есть, когда ее электрическое равновесие нарушается внешним импульсом, возникает периодический электрический ток. Этот период зависит не только от самоиндукции, электростатической емкости и омического сопротивления, как предполагалось ранее, но также, как обнаружил Пупин, от других сопротивлений «трения» цепи, таких как, например, магнитный и диэлектрический гистерезис. Однако омическое сопротивление и другие сопротивления «трения», как правило, можно уменьшить таким образом, чтобы они практически не влияли на период цепи. Процесс изменения периода цепи путем подходящего изменения ее коэффициента самоиндукции, или ее электростатической емкости, либо того и другого, Пупин назвал «настройкой схемы» (*tuning the circuit*).

Второй физический факт. Электромагнитное сопротивление в электрической схеме с уменьшенными сопротивлениями «трения» и магнитными сопротивлениями обеспечивает простую гармоническую электродвижущую силу, которая постепенно уменьшается с приближением периодичности или шага этой электродвижущей силы к периодичности или шагу цепи. Это минимум, который равен омическому сопротивлению цепи, когда две периодичности одинаковы, то есть, когда приложенная электродвижущая сила и цепь находятся в резонансе. Пупин обнаружил, что если на такую цепь действует комплексная гармоническая электродвижущая сила и если периодичность цепи значительно превышает максимальную периодичность гармоник, содержащихся в комплексной электродвижущей силе, то электромагнитное сопротивление, которое схема будет оказывать на различные составляющие гармоники электродвижущей силы, будет почти обратно пропорционально периодичности этих компонентов.

В патенте US6519346А Путин особо выделяет свой приоритет в открытии описанных выше двух физических фактов [7]:

«Я считаю, что я был первым, кто обратил внимание на части этих двух физических фактов, которые были особо подчеркнуты выше, и особенно то, что я был первым, кто обнаружил, что влияние магнитной и диэлектрической инерционности меняется в зависимости от периода воздействия электродвижущих сил и, особенно, с высокими периодами. Я безусловно считаю себя первым, кто практически применил эти принципы для целей передачи электроэнергии.

Я также обнаружил, что эти два физических факта и принцип, лежащий в их основе, могут быть расширены таким образом, чтобы включать схемы, разделенные на секции со вставленными конденсаторами, которые последовательно соединяют несколько секций схемы, то есть я обнаружил, что все правила настройки схемы могут быть применены к такой схеме в целом или к любой ее части. Это расширение — мое собственное открытие, и оно впервые раскрывается в этой спецификации. Это позволяет мне регулировать постоянную времени и электромагнитное сопротивление длинного проводника, и в то же время также уменьшать эффект ослабления из-за распределенной электростатической емкости, а также уменьшать электрическое поглощение в изоляции такого проводника».

Устройство для преодоления импеданса при телеграфировании или телефонировании представляло собой набор фильтров из параллельно соединенных катушек индуктивности и конденсаторов, настроенных на требуемую частоту. Фильтры включались в каждый провод двухпроводной цепи через определенные интервалы, рис. 3. Включение таких фильтров увеличило индуктивность линий и уменьшило затухание электрического сигнала.

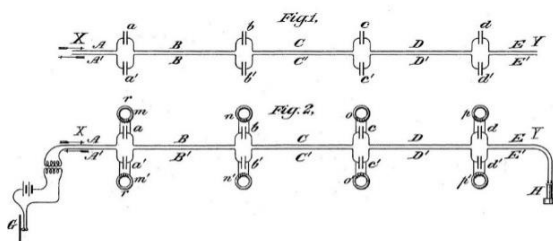


Рис.3. М. И. Пупин (крайний слева) и Ф. Б. Крокер (в центре со шляпой) со студентами 1-го курса Колумбии. Рисунок улучшенной телефонной линии из патента М. Пупина US6519346A с приоритетом от 14 декабря 1893 г. [7].

Fig. 3. M. I. Pupin (extreme left) and F. B. Crocker (center with hat) with 1st year Columbia students. Drawing of an improved telephone line from M. Pupin's patent US6519346A with a priority of December 14, 1893 [7]

Расчет сделанный в патенте US6519346A показывает, что телефонный ток, который может быть передан по только что описанному кабелю (рис. 3), будет намного больше, чем создаваемый электродвижущей силой индукционной катушки хорошего передатчика. Этот патент стал для Пупина отправной точкой в создании технологии нагрузочных катушек для телефонных линий, которая принесла ему известность в дальнейшем.

Пупин, невзирая на получение 8 мая 1894 года патента US6519346A, продолжил свои обширные теоретические и экспериментальные исследо-

вания низкочастотного электрического резонанса в телефонной линии, что нашло отражение в опубликованной им большой статье объемом около 40 страниц [8]. В статье описан разработанный им метод получения простых гармонических токов постоянной частоты, которые можно было точно измерить. Кроме этого, в ней приведены установленные некоторые особенности резонанса в электрических системах, состоящих из первичного и вторичного контуров с локальной самоиндукцией и емкостью.

Размышления о проблеме дальней телефонной связи не оставляли Майкла Пупина даже во время его научной стажировки в Европе, о чем он писал в своих воспоминаниях [3, р. 330]: «Решение проблемы я нашел во время летних каникул 1894 г., которые я проводил в Швейцарии. Во время прогулок, будучи один, я много размышлял о своем решении обобщенной проблемы Лагранжа. Однажды, поднимаясь на перевал Фурка¹¹ (*Furka pass*), мне пришла в голову мысль, что, поскольку при движении электричества по проводу действуют силы, аналогичные тем, которые возникают при движении материальных элементов в натянутой струне, мое *обобщенное решение задачи Лагранжа* должно быть применимо к движению электричества, и я сразу понял, что сделал очень важное изобретение». Из этого следовало, что метод построения кабелей и дальних воздушных линий для передачи энергии электрическими волнами, особенно для междугородной телефонии и телеграфии, представляет собой практическое применение общей механической теории распространения волн по неоднородным проводникам.

4. Механический аналог проводника электрических волн

Основные черты общей механической теории распространения волн по неоднородным проводникам можно прояснить очень простой механической иллюстрацией [9]. Рассмотрим рис. 8. У камертона жестко закреплена ручка *C*, рис. 4а. К одному из его концов прикреплен гибкий нерастяжимый шнур *BD*, рис. 8а. Другой конец шнура закреплён в точке *D*. Если позволить вилке камертона устойчиво вибрировать, поддерживая вибрацию электромагнитным или другим способом, то движение шнура будет волновым, рис. 4б.

Если сопротивление трению, препятствующее движению шнура, пренебрежимо мало, то волновое движение будет примерно таким, как показано на рис. 4б. Прямые волны, исходящие от камертона, и отраженные волны, исходящие из фиксированной точки *D*, будут иметь примерно

¹¹ Фурка (романш. *Furca*) или Фуркапасс (нем. *Furkapass*) — высокогорный перевал в Альпах, Швейцария. Его высота — 2 436 метров над уровнем моря. Перевал лежит на Большом европейском водоразделе. На этом перевале проходили съемки фильма «Голдфингер» о Джеймсе Бонде.

равные амплитуды, и за счет их интерференции будут образовывать примерно стационарные волны. Однако, если сопротивление трению не является пренебрежимо малым и струна, к примеру, лежит вдоль поверхности, о которую она трется при вибрации, или если она висит в расслабленном положении вместо того, чтобы находиться под натяжением между камертоном и точкой крепления, то тогда будет происходить диссипация энергии распространяющейся волны. Следовательно, прямая и отраженная волны не будут иметь одинаковые амплитуды, и, следовательно, их интерференция не приведет к возникновению стационарных волн. Затухание волн графически представлено на рис. 8в.

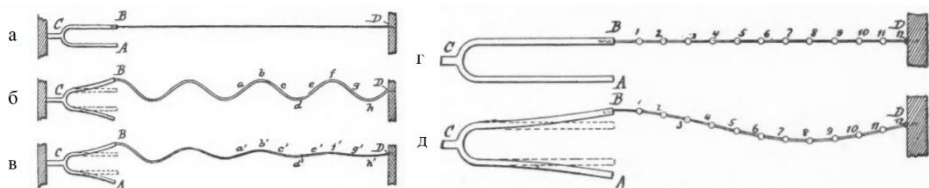


Рис. 4. Механическая модель распространения волн в шнуре, вызванных вибрацией камертона [9].

Fig. 4. Mechanical model of wave propagation in a cord caused by vibration of a tuning fork [9]

Эксперименты показывают, что при прочих равных условиях увеличение плотности струны уменьшает затухание, так как большая масса требует меньшей скорости для накопления заданного количества кинетической энергии, в то время как меньшая скорость приводит к меньшим потерям на трение. Это поразительная механическая иллюстрация волновода с большой индуктивностью. Здесь следует заметить, что увеличение плотности приводит к сокращению длины волны.

Теперь предположим, что мы прикрепим груз, скажем, шарик пчелиного воска, к средней точке нити, для увеличения вибрирующей массы. Этот груз станет источником отражений, и тогда меньше волновой энергии достигнет точки D, чем раньше. Эффективность передачи теперь будет меньше, чем до добавления веса.

Разделим пчелиный воск на три равные части и поместим их в трех равноудаленных точках вдоль шнура. Эффективность передачи волн будет лучше, чем когда весь парафин был сконцентрирован в одной точке. При дальнейшем разделении эффективность будет еще больше улучшена, но вскоре наступает момент, когда дальнейшее деление дает лишь незначительное улучшение. Этот момент достигается, когда нагруженный таким образом шнур вибрирует почти как однородный шнур с той же массой, натяжением и сопротивлением трению. Такой нагруженный шнур с насад-

кой-камертоном представлен на рис. 8г. На рис. 8д представлена вибрация шнура, несущего нагрузки на определенном расстоянии друг от друга.

Проблема определения надлежащего расстояния, на котором должны быть размещены нагрузки, является математической задачей аналитической механики. Эксперименты с шнурами такого рода показали, что *расстояние между нагрузками должно быть значительно меньше половины длины волны*, которая должна быть передана. Данный шнур может быть правильно загружен для некоторых длин волн, в то время такая загрузка не будет соответствовать для более коротких волн. Невозможно загрузить шнур таким образом, чтобы он был эквивалентен однородному шнуру для всех длин волн. Однако, если распределение нагрузок удовлетворяет требованиям для данной длины волны, то оно также будет удовлетворять им для всех более длинных волн.

Теперь следует заметить, что рассматриваемая здесь длина волны — это не длина волны шнура без нагрузок, а длина волны, которую рассматриваемая частота будет иметь на правильно нагруженном шнуре, или что-то же самое, что нагрузка на однородном шнуре той же массы, натяжения и сопротивления трения, что и нагруженный шнур.

Этот момент имеет фундаментальное значение, поскольку длина волны, соответствующая данной частоте, может и обычно будет намного короче на шнуре с нагрузкой, чем на шнуре без нагрузок. Такой шнур является механической аналогией проводника электрических волн. Математический закон, по которому движется такой шнур, тот же, в соответствии с которым электрический ток распространяется по волноводу под действием аналогичных сил. Причину этого искать не приходится. У нас есть одни и те же реакции в обоих случаях, а именно: кинетическая или массовая реакция, реакция натяжения и реакция сопротивления в случае шнура, электрокинетическая реакция, реакция емкости и реакция омического сопротивления в случае волновода.

Математическая модель этих реакций одинакова в обоих случаях, поэтому она является точной аналогией другой, то есть механической копией электрической. Правильно введенная нагрузка индукционными катушками на телефонный провод увеличит его способность передавать электрические волны. Неправильно расположенные нагрузки уменьшат эту способность.

Установка катушек индуктивности в периодически повторяющихся точках вдоль волновода или провода производит тот же эффект на передаче электрических волн, что и распределение небольших нагрузок вдоль натянутого шнура на рис. 8 при передаче механической волны по шнуру.

5. Распространение волн в конечной однородной телефонной линии

Пупин через год после отдыха с женой в Швейцарии, в феврале 1896 г. выступил с докладом «Электрические колебания на линейном проводнике с равномерно распределенной емкостью, самоиндукцией и сопротивлением» (англ. *Electrical oscillations on a linear conductor of uniformly distributed capacity, self-induction, and resistance*) на заседании Американского математического общества (англ. *American Mathematical Society*, сокращенно AMS). Текст этого доклада потом вошел в виде первой части в статью «Распространение длинных электрических волн» (англ. *Propagation of Long Electrical Waves*), опубликованную в 1899 г. [10, p. 100—120].

В этом докладе Пупин представил свою математическую теорию о распространения длинных электрических волн на линейном проводнике с равномерно распределенной емкостью, самоиндукцией и сопротивлением. В начале выступления он провел отличия между своими исследованиями по распространению электрических волн в средах и исследованиями Герца. Герц получил волны, длину которых было удобно измерять в пределах лаборатории. Колебания, которые излучают такие волны, имеют очень высокую частоту, близкую к тысяче миллионов колебаний в секунду.

В телефонии, телеграфии и передаче электроэнергии на большие расстояния используются колебания всего в несколько сотен колебаний в секунду или даже менее ста. Волны, сопровождающие эти медленные колебания, имеют длину в сотни миль. Поэтому представляется безнадежной задачей разработать экспериментальный метод исследования для этих чрезмерно длинных волн, подобный методу Герца для коротких волн, так называемых волн Герца. Это объясняет тот странный факт, что, хотя существует обширная масса экспериментальных фактов, которые проливают много света на математическую теорию волн Герца, в настоящее время едва ли существует один эксперимент, который может пролить какой-либо свет на математическую теорию длинных электрических волн.

На первый взгляд кажется, что не должно быть никакой разницы между математической теорией коротких волн и теорией длинных волн, и что все, что проливает свет на одни волны, должно также описывать и другие волны. Но это различие действительно существует, и оно связано с тем фактом, что волны Герца являются волнами, излучаемыми свободными колебаниями, тогда как длинные волны, используемые в телеграфии, телефонии и передаче энергии на большие расстояния, обусловлены вынужденными электрическими колебаниями. Таким образом, одна теория имеет дело со свободными, а другая — главным образом с вынужденными

электрическими колебаниями. Кроме того, эти длинные волны обычно исходят от оконечного устройства с большим сопротивлением, и основная цель их передачи состоит в том, чтобы они были поглощены в приемном устройстве с большим сопротивлением. В связи с этим возникает вопрос: «Как много энергии, передаваемой с одного конца, принимается на другом конце?» Это является основным вопросом в математической теории длинных волн. Поэтому экспериментальные исследования, которые так много сделали для нашего ясного понимания распространения волн Герца, могут лишь немного помочь нам в расширении наших знаний о математической теории распространения электрической энергии для телеграфии, телефонии и передачи энергии на большие расстояния.

Короткость длины волны делает колебания Герца управляемыми, в то время как сделать это с чрезмерно длинной волной при экспериментальном исследовании распространения медленно чередующихся электрических колебаний практически невозможно. Но обязательно ли длительный период означает длинную волну? Длина волны натриевого света, например, в стекле короче, чем в вакууме, потому что в стекле свет распространяется медленнее, чем в вакууме. Если бы мы могли увеличить показатель преломления стекла до любого значения, которое нам заблагорассудится, мы могли бы соответственно уменьшить длину волны. Все дело в скорости распространения. Самый простой способ исследования этой скорости разработал Френель. Он установил на одном основании на поверхности раздела двух рассматриваемых сред два параллельных луча цилиндра, один из которых находился в вакууме, а другой закрывался стеклом. Если высоты этих двух цилиндров будут равны расстоянию, пройденному лучом при скорости распространения в двух средах за 1 секунду, то тогда любая лучистая энергия, которая была в одном из цилиндров в любой данный момент, будет в другом по прошествии одной секунды.

Следовательно, скорость распространения пропорциональна количеству энергии, которое среда накапливает на единицу длины прямолинейного пути луча, когда через него распространяется заданное напряжение. Если бы вместо стекла мы поставили на пути луча вещество, которое могло бы накапливать в миллион раз больше энергии на единицу длины прямолинейного пути, чем вакуум, когда через них распространяется тот же луч, то мы должны были бы иметь скорость и, следовательно, длину волны также в миллион раз меньше в этой среде, чем в вакууме.

Пупин в качестве модели однородного проводника по которому распространяются электрические волны использовал петлю из проволоки АВ, рис. 5. В одной точке контура находится передающее устройство А, в про-

типоволожной точке — приемное устройство B . Расстояние между A и B равно l , равное половине длины всей петли. Расстояние любого элемента ds от A равно s .

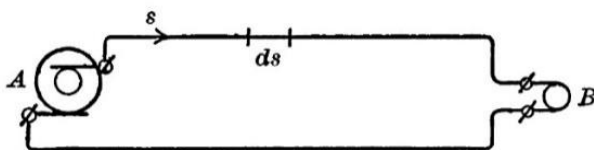


Рис. 5. М. И. Пупин (фото конца 19 века).

Распространение волны вдоль однородного линейного проводника.

Fig. 5. M. I. Pupin (photo of the late 19th century).

Wave propagation along a uniform linear conductor

Проводная линия характеризуется L , R , C — коэффициентом самоиндукции, омическим сопротивлением и емкостью соответственно на единицу длины линии. Если i — ток, а V — потенциал в любом элементе ds , тогда, полагая сумму реакций в ds равной нулю, и в соответствии с законом равенства действия и противодействия, можно записать

$$\left(L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{\delta V}{\delta s} \right) ds = 0. \quad (1)$$

Теперь следует сделать замечание, которое обычно упускается из виду. При составлении этого уравнения не учитывались диссипативные реакции, возникающие в соседних проводниках. Введенная таким образом неточность невелика для воздушных линий. В случае подводных кабелей ошибки, возникающие в результате этого, могут быть значительными.

Если x — ток смещения, то

$$x = C \frac{dV}{dt} = - \frac{\delta i}{\delta s}. \quad (2)$$

Дифференцируя (1) по t и (2) по s , после преобразований получим следующее дифференциальное уравнение для тока:

$$L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + R \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{C} \frac{\partial^2 i}{\partial s^2}. \quad (3)$$

Ток распространяется в виде плоской волны. Скорость распространения v при пренебрежении влиянием сопротивления R , определяется выражением

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

Уравнение (3) является математическим выражением закона равенства действия и противодействия в любой точке линии, где *однородность* линии не нарушается расположением передающего или принимающего устройства. Но в точках, где находится такое устройство, математическое выражение для закона равенства действия и реакции отличается от (3) и должно определяться из физических соображений в каждом конкретном случае. В таких точках уравнение распространения будет другим.

Пупин получил общее решение уравнения (3) для тока в конечной *однородной* линии в виде

$$i = (K_1 \cos m\xi + K_2 \sin m\xi)e^{k_1 t}, \quad (5)$$

где $\xi = l - s$, а отсчет начала координат начинается от места расположения приемного устройства (нагрузки).

Решение (5) удовлетворяет (3) при условии, что

$$-m^2 = k_1 C(k_1 L + R).$$

В решении (5) константы K_1 , K_2 и k_1 определяются таким образом, чтобы удовлетворить граничным условиям на генераторе и нагрузке.

В качестве общего решения Пупин рассмотрел вариант, который допускает произвольный выбор генератора и нагрузки. Он получил наиболее общее решение проблемы, которое описывает как вынужденные, так и свободные колебания в конечной *однородной* линии:

$$i = (2m \cos m\xi + h_1 \sin m\xi) \frac{D_0 e^{kt}}{F}, \quad (6)$$

где h_1 , D_0 , F , k – константы, выражение которых даны в работе Пупина [10, р. 103].

Решение (6) для тока вдоль линии позже было применено Пупином для расчета свободных и вынуждающих колебаний на линии передачи, у которой на ее концах различные параметры импеданса генератора и нагрузки.

Один из важных выводов, сделанных Пупином на основе проанализированных им примеров по распространению в проводнике электрических волн, заключался в том, что каждую волну тока можно разложить на две составляющие: амортизированную волну тока, движущуюся к генератору, и волну, движущуюся к нагрузке. Пупин пришел к выводу, что если затухание на линии невелико, то на линии будет присутствовать полная стоячая волна. Как упоминалось ранее, Пупин в своем подходе не определял характеристическое сопротивление, так как считал поведение тока в

условиях сильного отражения от нагрузки наиболее важным. Он отметил, что важно не только установить небольшое сопротивление на единицу длины, но и увеличить величину $\omega L/R$. Эквивалентно анализу схемы с простым переменным током, он определил коэффициент мощности как $\cos \theta$, где $\tan \theta = \omega L/R$. В случае простых цепей с потерями следует постараться сделать так, чтобы реактивная мощность была значительно выше активной мощности, так как эта накопленная энергия возвращается в генератор в случае простой цепи и распространяется в случае длинных проводов. Кроме того, Пупин подчеркнул разницу между анализом простой схемы и распространением тока по линии передачи, поскольку в последнем случае требуется максимальная мощность, подаваемая на нагрузку.

Заметим, что изложенная теория Пупина настоятельно рекомендует использование линейных проводов с высокой индуктивностью для передачи энергии на большие расстояния электрическими волнами, но в ней ничего не сказано о том, как практически построить такие линии, обладающие этим очень желательным свойством. Этот вопрос Пупин частично прояснил в последующем, в частности, в полученных патентах.

6. Распространение волн в нагруженном проводнике

По прошествии трех лет Пупин в марте 1899 года выступил с новым докладом «*Колесания на нагруженном проводнике*» (англ. *Oscillations on a loaded conductor*) на заседании Американского математического общества (AMS). Текст этого доклада потом вошел в виде второй и третьей частей в статью, опубликованную в 1899 г. [10, р. 120—134; р. 134—142]. Вторая часть доклада содержала две практические схемы нагруженных линий, третья — эксперименты с проводниками с низкой скоростью и конструкцию нагрузочной катушки индуктивности без сердечника.

14 декабря 1899 года Пупин подал патентную заявку «Метод уменьшения затухания электрических волн и устройства для этого» (англ. *Art of reducing attenuation of electrical waves and apparatus therefor*) [11]. В полученном 19 июня 1900 г. патенте US652230A Пупин закреплял свой приоритет в теории и схемах построения нагрузочных телефонных линий с оригинальной конструкцией катушек индуктивности. В текстовой части патента приведена механическая аналогия проводника электрических волн, кратко изложены основные результаты теории распространения электрических волн в проводниках применительно к телефонным линиям большой протяженности. В работе приведены те же, что и в статье [9], схемы нагруженных линий, а также оригинальная конструкция нагрузочной катушки индуктивности на кольцевом сердечнике из тонких железных пластин.

В патенте Пупин описал два типа нагруженных линий, которые в дальнейшем стали называть пупинизированными линиями. Схемы этих линий являются копиями рис. 4 и 5 из его статьи. Первый тип нагруженной линии состоит из последовательно соединенных катушек и конденсаторов, которые соединяют противоположные точки линии (рис. 6а). Второй тип линии отличается от первого только включением конденсаторов, которые в каждом проводе соединяют контакт между двумя последовательно соединенными индуктивностями и землей, рис. 6б. Второй тип линии представлен Пупином как «медленный» проводник, поскольку скорость распространения сигнала по такому проводнику меньше, чем по обычным линиям.

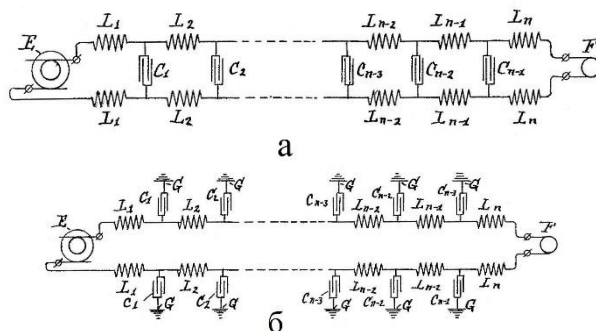


Рис. 6. Два типа однородных телефонных линий: а — I тип и б — II тип (медленный проводник). Рисунки из патента Пупина US652230A с приоритетом от 14 декабря 1899 г. [11].

Fig. 6. Two types of uniform telephone lines: а – type I and б – type II (slow conductor).

Drawings from Pupin's patent US652230A with priority of December 14, 1899 [11]

В схемах рис. 6а и рис. 6б индуктивности $L_1, L_2 \dots L_n$ представляют собой небольшие катушки без железного сердечника (рис. 7а), намотанные на деревянные каркасы, каждая катушка имеет самоиндукцию приблизительно 0,0125 Гн и сопротивление 2,5 Ом. Эти катушки соединены последовательно, образуя непрерывную линию, которая соединяет генератор E с приемным прибором F . В реальной телефонной линии было 400 нагрузочных катушек, показанных на рис. 7б, небольшие конденсаторы $C_1, C_2 \dots C_{n-1}$, соединяющие противоположные точки линии (рис. 6а) или соединяющие точки между последовательными катушками с землей G (рис. 6б), имели емкость приблизительно 0,025 мкФ.

Математическая теория Пупина описывает протекание переменного тока в медленном проводнике. Эта теория позволяет ответить на вопрос, насколько такой проводник похож на обычную телефонную линию с равномерно распределенной самоиндукцией, емкостью и сопротивлением. В статье [10] дан ответ, что с частотой до 1кГц такая линия представляет

собой почти обычную телефонную линию с индуктивностью 0,005 Гн на 1 милю, сопротивлением 1 Ом и емкостью 0,01 мкФ. Медленный проводник даже на частоте 3 кГц представляет собой приблизительно обычную линию с равномерно распределенными индуктивностью, сопротивлением и емкостью. При этом погрешность в пределах ошибок наблюдения составляет около 1—2 %. Для более низких частот это верно с гораздо более высокой степенью точности, что вполне достаточно для всех частот, которые имеют какое-либо значение при телефонной передаче речи.

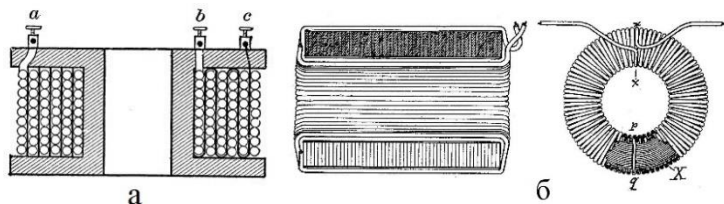


Рис. 7. Нагрузочные катушки Пупина: а — экспериментальный вариант [10],
 б — промышленный вариант [11].

Fig. 7. Loading coils of Pupin: a – experimental version [10], b – industrial version [11]

Линия с высоким потенциалом или высокой самоиндуктивностью имеет не только преимущество небольшого затухания, но и другое преимущество, имеющее огромное значение в телефонии, а именно очень небольшое искажение в том смысле, что все частоты, присутствующие в человеческом голосе, ослабляются почти в одинаковой степени. Следовательно, это линия без искажений. Пупин в патенте US652230A отмечает [11]: «Я разработал следующее общее правило: если n — количество катушек на длину волны, то для этой длины волны медленный проводник будет представлять собой обычную телефонную линию с точностью формулы:

$$\sin \frac{\pi}{n} \approx \frac{\pi}{n}. \quad (7)$$

Так, например, при $n = 16$

$$\frac{\pi}{16} = 0,196, \quad \sin \frac{\pi}{16} = 0,196 - 0,0122+,$$

Следовательно, $\sin \frac{\pi}{16}$ отличается от $\frac{\pi}{16}$ примерно на $\frac{2}{3} \%$ от значения $\frac{\pi}{16}$. Это правило было найдено мной теоретически и подтверждено с помощью экспериментов».

Для характеристики степени приближения проводника с нагрузочными катушками к обычной телефонной линии Пупин ввел характеристику, которую назвал «угловым расстоянием между двумя точками на ли-

нейном проводнике». Две точки на линейном расстоянии длины волны λ имеют угловое расстояние 2π . Из этого понятия следует, что эти точки на линейном расстоянии λ/n будут иметь угловое расстояние $2\pi/n$. Тогда приведенное выше условие (7) теперь можно сформулировать следующим образом: проводник с низкой скоростью напоминает обычный линейный проводник со степенью приближения, измеряемой соотношением синуса половины углового расстояния, пройденного катушкой, к половине самого углового расстояния. Это правило стало основой изобретения Пупина и позволило определиться со II типом медленного проводника (рис. 6б), который лучше приспособлен для коммерческого использования (уменьшения затухания электрических волн). Эти теоретические выводы были подтверждены результатами эксперимента, приведенного в статье.

Медленный проводник II типа (рис. 6б), Пупин назвал «проводником с реактивным сопротивлением». Этот проводник отличается тем, что имеет равномерно распределенные емкость, индуктивность и сопротивление вместо сосредоточенных емкости, индуктивности и сопротивления. Следовательно, проводник реактивного сопротивления представляет собой длинный электрический провод, имеющий по возможности равные источники реактивного сопротивления (индуктивности), расположенные последовательно с желательными равными интервалами. Разумно ожидать, что реактивный медленный проводник II типа будет работать как обычная однородная линия с той же индуктивностью, емкостью и сопротивлением на единицу длины при тех же условиях, при которых так работает медленный проводник I типа.

Для телефонии угловое расстояние между любыми двумя последовательными катушками должно в достаточной степени удовлетворять ранее приведенному условию для самой высокой частоты, что имеет важное значение при телефонной передаче речи. В тексте патента US652230A сказано [29], что катушки должны быть изготовлены, предпочтительно, без железных сердечников, чтобы максимально избежать гистерезиса и потерь тока Фуко, а также искажений тока. Если по каким-либо особым причинам требуются катушки небольших размеров на единицу индуктивности, то следует использовать железо, желательнее сталь самого высокого качества и максимально снизить намагниченность.

7. Теория распространения волн по неоднородным электрическим проводникам

Через две недели после подачи патентной заявки [11], почти перед самым Новым годом, 28 декабря 1899 г., Пупин выступил с обобщающим

докладом «Распространение волн по неоднородным электрическим проводникам» (англ. *Wave propagation over non-uniform electrical conductors*) на заседании Американского математического общества (AMS). Этот доклад позже, в 1900 г, в виде статьи был опубликован в трудах этого общества [12]. Статья называлась «Передача волн по неоднородным кабелям и линиям на большие расстояния» (*Wave Transmission over Non-uniform Cables and Long Distance Lines*). В работе Пупин рассмотрел одну модель однородного и две модели неоднородных проводников. Под неоднородным проводником понимался однородный проводник, в цепь которого включены секции индуктивных элементов, емкостей и резисторов по двум схемам. Основная задача этого исследования заключалась в установлении условий, при которых каждый из двух типов неоднородных проводников был бы эквивалентен соответствующему однородному проводнику, то есть определить частоты, для которых эти два проводника будут иметь *примерно одинаковые длины волн и одинаковые коэффициенты затухания*.

Сначала М. Пупин исследовал распространение волны с заданным периодом вдоль однородного линейного проводника, рис. 5. Проблему с математической точки зрения он сформулировал в виде уравнения в частных производных (3), которое получил в работе [10]. Однако граничные условия в этом уравнении были сформулированы другие, с учетом передающего и приемного устройств. Основная трудность при этом состояла в корректности математической формулировки этих граничных условий, необходимых для получения системы уравнений, которую можно было решить без особых трудностей.

Для формулировки двух граничных условий, одного на приемном, другого — на передающем устройстве, были введены L_0, R_0, C_0 и L_1, R_1, C_1 , которые соответственно являются индуктивностью, сопротивлением, емкостью передающего и приемного устройств. Каждое из них содержит конденсатор, последовательно соединенный со своей индуктивностью и сопротивлением. Граничные условия при этом выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} -2\left(\frac{\partial i}{\partial s}\right)_{s=0} = (D_0 - h_0 i)_{s=0} & \text{у передающего устройства,} \\ +2\left(\frac{\partial i}{\partial s}\right)_{s=l} = -(h_1 i)_{s=l} & \text{у приемного устройства,} \end{cases} \quad (11)$$

где $D_0 = ipC_0 E e^{ipt}$, $h_0 = C_0(-p^2 \lambda_0 + jpR_0)$, $h_1 = C_1(-p^2 \lambda_1 + jpR_1)$,

$$\lambda_0 = L_0 - \frac{1}{p^2 C_0}, \lambda_1 = L_1 - \frac{1}{p^2 C_1}.$$

Физический характер проблемы предполагает следующее решение

$$i = K_1 \cos \mu \xi + K_2 \sin \mu \xi, \quad (12)$$

где $\xi = -s$, и K_1 и K_2 пропорциональны e^{-jpt} .

Уравнение (10) выполняется для всех значениях K_1 и K_2 , если

$$C(-p^2 L + jpR) = -\mu^2 = -(\alpha + j\beta)^2.$$

Отсюда получим

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{1}{2} p C (\sqrt{p^2 L^2 + R^2} + pL)}, \\ \beta &= \sqrt{\frac{1}{2} p C (\sqrt{p^2 L^2 + R^2} - pL)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Когда pL значительно больше по сравнению с R , то $\alpha = p\sqrt{LC}$,

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (14)$$

В случае двойного проводника, где взаимная емкость велика по сравнению с емкостью каждого проводника с землей, в формулах следует заменить R и L на $2R$ и $2L$.

Граничные условия будут выполнены, если

$$K_1 = \frac{2\mu D_0}{F}, K_2 = \frac{h_1 D_0}{F}, \text{ где } F = (h_0 h_1 - 4\mu^2) \sin \mu l + 2\mu(h_0 + h_1) \cos \mu l.$$

Тогда (12) можно записать в виде

$$i = (2\mu \cos \mu \xi + h_1 \sin \mu \xi) \frac{D_0}{F}. \quad (15)$$

Выражение (15) представляет собой общее решение уравнения распространения волн заданного периода (10). Уравнение описывает простые гармонические затухающие волны. Наиболее важными элементами, которые входят в описание таких волн, являются длина волны λ и коэффициент затухания β . Их можно рассчитать: так как $\mu = \alpha + j\beta$, то имеем $\lambda = 2\pi/\alpha$ и коэффициент ослабления $e^{-\beta\xi}$. Очевидно, что β уменьшается по мере увеличения L . Высокое реактивное сопротивление на единицу длины означает небольшое затухание и низкую скорость распространения.

Это общее решение (15) для тока телефонной линии применимо для расчета свободных и вынужденных колебаний на линии передачи, оканчивающейся на ее концах с различными параметрами импеданса генератора и нагрузки.

После этого М. Пупин рассмотрел электрические колебания в неоднородных электрических проводниках первого и второго рода, рис. 8. Для этого типа проводников были определены условия, аналогичные (7), при которых они эквивалентны однородным проводникам.

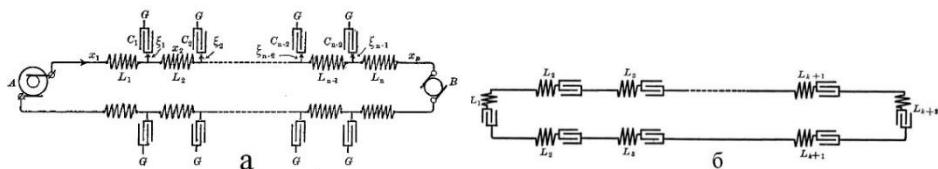


Рис. 8. Два типа неоднородных телефонных линий: а — I тип и б — II тип [12].

Fig. 8. Two types of non-uniform telephone lines: a - type I and b - type II [12]

Обозначим расстояние между двумя последовательными точками индуктивности, то есть точками, в которые вводятся катушки индуктивности, через l , и пусть длина волны, которая должна быть передана, равна λ . Тогда для определения условий, когда неоднородные проводники эквивалентны своим соответствующим однородным проводникам, вводится угол Φ такой, что

$$\frac{\Phi}{2\pi} = \frac{l}{\lambda}. \quad (16)$$

Угол Φ называется «угловым расстоянием между точками индуктивности для неоднородного проводника» или источниками индуктивности. Угловое расстояние 2π соответствует длине волны. Закон, который определяет степень эквивалентности между неоднородным проводником и соответствующим ему однородным проводником, теперь может быть сформулирован следующим образом: неоднородный проводник настолько же почти эквивалентен своему соответствующему однородному проводнику, если $\sin \Phi/2 \approx \Phi/2$.

Очевидно, что значение Φ обратно пропорционально длине волны, так что для данного расстояния между точками реактивного сопротивления степень эквивалентности уменьшается по мере уменьшения длины волны. Если волна сложной гармонической частоты, например, в телефонной связи, передается по неоднородному проводнику, то действие проводника будет различным для разных компонентов этой сложной гармонической волны. Если, однако, неоднородный проводник действует с достаточным приближением к однородному проводнику по направлению к наивысшей частоте этой комплексной волны, то его приближение к однородному проводнику будет еще выше для более низких частот и, следовательно, для всех остальных частот.

Нужно заметить, что теория М. Пупина имеет существенное отличие от теории Дж. Кэмпбелла. Из нее не следуют в явном или неявном виде аналитические выражения для определения индуктивности нагрузочных катушек и расстояния между ними. В таком виде теория М. Пупина вызывает некоторые затруднения при инженерных расчетах. Это подтверждается словами Френка Джеветта¹² [13]: «Однако следует отметить тот факт, что анализ проблемы Кэмпбеллом на самом деле более подробный, чем анализ Пупина, который привел его к формулировке правил проектирования нагрузочных катушек и их расстояний и которые с самого начала были единственными, применяемыми в этой стране. Этой единственной работой, выполненной в течение относительно короткого времени после его пребывания в компании *Bell*, Кэмпбелл продемонстрировал свои уникальные способности в математической физике, а также умение формулировать выводы в форме, которую инженер-разработчик мог бы использовать в практических приложениях». Для строительства загруженных линий в США использовались только формулы Кэмпбелла [14]. Кэмпбелл во время работы над проблемами дальней телефонной связи, попутно, изобрел свой знаменитый волновой фильтр.

8. Практические аспекты теории Пупина

Пупин впервые привлек внимание специалистов-электротехников к использованию нагрузочных катушек в телефонных линиях, когда он прочитал доклад «Распространение волн по неоднородным кабелям и воздушным линиям большой протяженности» (англ. *Wave Propagation over Non-Uniform Cables and Long Distance Air-Lines*) на собрании Американского института инженеров-электриков (*AIEE*) 19 мая 1900 года в Филадельфии. Доклад был опубликован в виде статьи [15], которая содержала теоретический материал по загрузке телефонных линий из его предыдущих докладов перед *AIEE* и, кроме этого, некоторые экспериментальные результаты, полученные на недавно построенной искусственной линии. Что касается Кэмпбелла, то он провел подобные испытания примерно годом ранее, а нагрузил реальный телефонный кабель за 8 месяцев до этого. Кэмпбеллом также были разработаны нагруженные схемы, которые были

¹² Джеветт Фрэнк Б. (*Frank Baldmin Jewett*, 05.09. 1879—11.18.1949) в 1898 году окончил Технологический институт Трупа (позже Калифорнийский технологический институт), получил докторскую степень по физике в 1902 году. С 1902—1904 гг. — преподаватель в Массачусетском технологическом институте в Кембридже. С 1904 года — сотрудник технического отдела AT&T в Бостоне. Первоначально помощник Кэмпбелла в исследованиях, связанных с телефонной передачей. Затем, в 1906 году, он сменил Кэмпбелла на посту директора исследовательской группы по передаче.

изготовлены для практического пользования за день до 19 мая, когда был прочитан доклад Пупина [16].

Завершающим аккордом Пупина в его исследованиях распространения волн по неоднородным электрическим проводникам стала подача 28 мая 1900 г. патентной заявки на «Способ уменьшения затухания электрических волн» (англ. *Art of reducing attenuation of electrical waves*). Патент US652231A на это изобретение был получен 19 июня 1900 г. [17]. Этот патент стал ответом на требования Патентного ведомства о делении формулы изобретения патентной заявки, поданной 14 декабря 1899 г., на устройство и способ. Полученные Пупином патенты US652230A и US652231A содержат одни и те же рисунки, а также большую часть общего текста и отличаются только формулами изобретений. Формула изобретения в патенте US652231A сформулирована одним абзацем, следующим образом [17]:

«Способ уменьшения постоянной затухания однородного волновода, который заключается в увеличении индуктивности проводника в достаточной степени, чтобы обеспечить требуемое уменьшение постоянной затухания, путем распределения вдоль него источников индуктивности в периодически повторяющихся точках, при этом расстояние между последовательными точками должно быть таким, чтобы приблизительно сохранить его характер как однородного проводника по отношению к передаваемым волнам, по существу, как описано».

В патентах US652230A и US652231A дан расчет нагрузочных катушек для воздушной телефонной линии и подводного кабеля на основе теории Пупина. Приведем пример расчета воздушной линии с нагрузочными катушками.

Предположим, что требуется передавать речь по телефону на расстоянии 3000 миль по проводу, натянутому на столбах. Общий коэффициент затухания β на этом расстоянии должен быть примерно таким же, как и в лучших сетях Нью-Йорк — Чикаго американской телефонной компании *Bell*, что соответствует без утечки току около $i = e^{-1,5}$ для самой высокой частоты, имеющей значение в речи, а именно около 1,5 кГц. Предлагается сначала указать условия, которые дадут коэффициент затухания при $i = e^{-1,5}$ при длине в 3000 миль.

Величина тока в любой точке линии определяется по формуле $i = I_0 e^{-l\beta}$, где I_0 — начальный ток, l — расстояние от начальной точки линии до точки, в которой должен быть определен ток i . Тогда приравняв токи $e^{-3000\beta} = e^{-1,5}$ получим $3000\beta = 1,5$.

Предположим, что используется медный провод с сопротивлением 4 Ом на милю и что дополнительное сопротивление, вносимое катушками

индуктивности, составляет 0,6 Ом на милю. Полное сопротивление на милю тогда будет 4,6 Ом. Когда реактивное сопротивление на милю достаточно велико по сравнению с активным сопротивлением, для определения индуктивности можно воспользоваться упрощенной формулой для коэффициента затухания:

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (17)$$

Из (17) видно, что β не зависит от частоты и, следовательно, проводник с реактивным сопротивлением не имеет искажений. Пропускная способность C для провода 4 Ом на милю составляет 0,01 мФ, провод подвешивается так, как подвешиваются междугородние воздушные линии американской телефонной компании *Bell*. Индуктивностью провода можно пренебречь, и далее будем рассматривать L исключительно из-за индуктивности — основного параметра катушек индуктивности. Значение индуктивности, которое будет удовлетворять предполагаемым условиям, может рассчитываться по приведенной выше формуле следующим образом:

$$3000\beta = 3000 \frac{4,6}{2} \frac{1}{10^3} \sqrt{\frac{0,01}{L}} = 1,5. \quad (18)$$

Из (18) получим величину индуктивности одной нагрузочной катушки $L = 0,2$ Гн/миля.

В телефонии самая высокая частота, необходимая для передачи членораздельной речи, составляет около 1,5 кГц. Это соответствует верхним гармоникам или обертонам в некоторых согласных звуках. Следовательно, длина волны на этой частоте рассчитывается для данного проводника вместе с нагрузочными катушками, которые имеют определенное общее сопротивление, емкость и индуктивность, которые, как предполагается, равномерно распределены. *Это предположение приблизительно верно, как показал Пупин, в проводнике, имеющем не менее восьми или десяти катушек на длину волны [18].*

В нашем примере вычислим длину волны для самой высокой частоты, которую следует учитывать, а именно, 1,5 кГц.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{p\sqrt{LC}} = \frac{10^3}{1500\sqrt{0,2 \times 0,01}} \approx 15 \text{ миль}. \quad (19)$$

Достаточно высокая степень приближения к единой телефонной линии будет получена, если мы будем использовать 15 катушек на длину волны самой высокой частоты. Это одна катушка на милю с индуктивностью $L = 0,2$ Гн и сопротивлением $R = 0,6$ Ом.

Если увеличение самоиндукции телефонной линии производится при помощи специальных катушек индуктивности, то эти включаемые в нее элементы называют «пупиновские катушки» (их индуктивность 1—140 мГн), а саму линию с нагрузочными катушками в честь Пупина называют пупинизированной, рис. 9.

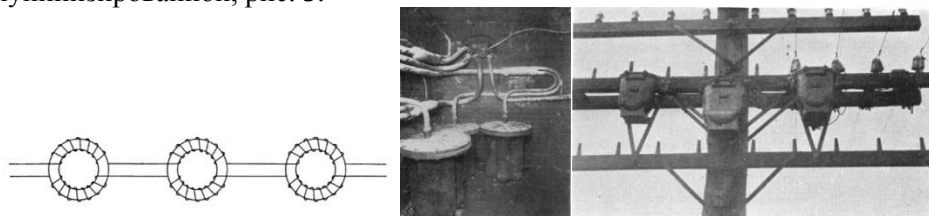


Рис. 9. Схема нагружения обмоток катушки и способ подключения в линию.
Подземный люк с нагрузочными катушками. Нагрузочные катушки,
размещенные на открытой проводной линии.

Fig. 9. Diagram of loading coil windings and method of connecting into a line.
Underground manhole containing loading coils. Loading coils placed on an open wire line

Процесс установки катушек на линии связи назван «пупинизацией». Пупинизированная линия состоит из ряда последовательно соединенных звеньев. Расстояние между двумя соседними катушками получило название шага пупинизации, который лежит в интервале 0,3—2 км.

9. Компромисс в патентном соперничестве Дж. Кэмпбелла и Майкла Пупина

Компания AT&T была озадачена, когда узнала о получении Майклом Пупином патента на катушку индуктивности для увеличения самоиндукции телефонной линии. В мае 1900 года Кэмпбеллу стало известно о претензиях профессора Колумбийского университета Майкла Пупина на приоритет в изобретении нагрузочных катушек для телефонных линий. AT&T повела судебную тяжбу с Пупиным в отношении его претензий. Хотя Пупин и получил первым патент, но Кэмпбелл к этому времени уже провел практические демонстрации, прежде чем Пупин подал заявку на получение патента (14 декабря 1899 г.). Задержка Кэмпбелла в подаче заявки произошла из-за низкой квалификации сотрудников юридического отдела компании *Bell*, отвечавших за ее оформление. Нужно заметить, что патенты Дж. Кэмпбелла и М. Пупина очень отличаются друг от друга, как по конструкции нагрузочных катушек, так и по схемам их включения в телефонную линию.

Патент Пупина содержал формулы расчета индуктивных элементов линии, хотя менее точные, чем раннее полученные Кэмпбеллом и не приве-

денные в его заявке. Это ослабляло позиции *AT&T*, которая могла быть обвинена в неполном раскрытии сути изобретения. Опасаясь, что существует опасность того, что спор может закончиться объявлением непатентоспособности изобретения Кэмпбелла, компания *Bell* решила купить опцион¹³ на патенты Пупина за \$185000 плюс \$15000 в год на 17 летний срок действия патентов. К январю 1901 г. Пупину было выплачено \$ 200000.

Компания *AT&T* благодаря покупке патентов Пупина лишила потенциальных конкурентов возможности воспользоваться новыми технологиями и монополизировала технологии по приобретенным двум патентам, которые были ей необходимы для постройки телефонных линий на большие расстояния.

В *AT&T*, невзирая на покупку патентов, продолжали совершенствовать нагрузочные индуктивные технологии и проводить исследования свойств пупинизированных линий под руководством Дж. Кэмпбелла. В 1903 году он опубликовал некоторые результаты [20], среди которых следует выделить обнаруженный частотно-зависимый эффект таких линий. Этот эффект заключается в том, что линии Пупина имеют четко выраженную критическую частоту, которая проявляется во внезапном изменении характеристик затухания. Ниже этой частоты затухание мало и зависит только от паразитных потерь кабеля. Если эти потери равны нулю, а частота ниже критической, то оно также равно нулю. Если же затухание большое и частота выше критической, то оно практически не зависит от потерь в кабеле. Переход на критическую частоту может быть очень резким. Критическая частота определяется расстоянием между катушками и соответствует длине волны равной удвоенному расстоянию между ними.

Полученный результат объясняет тот факт, почему не удалось получить качественную связь на трансконтинентальных пупинизированных телефонных линиях. По таким кабелям можно передавать только ограниченный диапазон частот, что и является их основным недостатком.

В апреле 1904 года спор, возникший между двумя учеными, в конечном счете был решен в пользу Пупина. Основанием явилось то, что Пупин запатентовал свое изобретение раньше, чем Кэмпбелл. В 1917 году закончилась монополия *AT&T* на нагрузочные технологии, и платежи Пупину прекратились. Он к этому времени получил в общей сложности \$ 455000.

Устройства загрузки телефонных линий оказались весьма ценным активом для компании *Bell*. Технический документ, опубликованный в

¹³ Опцион — это договор, который дает право, но не обязанность купить или продать какой-либо актив (акцию, фьючерс, товар и т. д.) по фиксированной цене в течение жизни опциона или в определенный момент времени.

Трудах *AIEE* в 1926 году, показал, что нагрузочные катушки на тот момент позволили сэкономить для *AT&T* около \$100 000 000.

Наиболее значимыми последствиями спора за нагрузочные технологии явилось то, что компания *Bell* осознано выбрала путь освоения наукоемких технологий и более агрессивного поиска патентов.

После теоретических и экспериментальных исследований, проведенных Дж. Кэмпбеллом и М. Пупином, ситуация в вопросе дальнего телефонирования изменилась. Для искусственного увеличения индуктивности телефонных линий связи стали широко использовать специальные катушки индуктивности, включаемые в линию через определенные промежутки последовательно с проводами, рис. 9. Однако на трансконтинентальных телефонных линиях, как уже было сказано, получить качественную связь путем пупинизации линии не удалось, здесь нужны были другие технологии, чем в дальнейшем и занялась компания *AT&T*.

10. Горечь Хевисайда

Прис не допустил, чтобы предложение Хевисайда о загрузке было опробовано на междугородних телефонных линиях в Великобритании в 1890-х годах, а также отговорил частные кабельные компании от ее применения на подводных кабелях, где в любом случае механические трудности затрудняли ее использование. В то время как в США группа инженеров *AT&T* подхватила идею Хевисайда и к 1899 году запустила загруженную телефонную линию. Загрузка оказалась очень успешной и позволила построить работоспособные междугородние телефонные линии и подземные кабели за небольшую часть их прежней стоимости.

Профессор физики Колумбийского университета Майкл Пупин получил патенты на индуктивную загрузку в 1900 году, а затем продал на них права при несколько сомнительных обстоятельствах *AT&T*. После этого Хевисайд стал презирать Пупина и *AT&T*. Для правовой защиты у него было мало средств [20].

Математик Норберт Винер¹⁴ из Массачусетского технологического института позже поддержал принципиальную в данной ситуации позицию Хевисайда. Он осудил *AT&T* и Пупина как воров и в 1959 году представил Хевисайда (слегка замаскированного) героем довольно драматичного романа «Искуситель» (англ. *The Tempter*) [21, 22]. Винер даже пытался заин-

¹⁴ Норберт Винер (англ. *Norbert Wiener*, 26.11.1894—18.03.1964) — американский математик, один из основоположников кибернетики (считается «Отцом кибернетики») и теории искусственного интеллекта.

тересовать кинорежиссера Орсона Уэллса¹⁵ в создании фильма о Хевисайде, но фильм не был создан, рис. 10 [23].

Летом 1960 года Норберт Винер посетил Москву, где с 27 июня по 6 июля проходил 1-й Международный конгресс ИФАК (*Международная федерация по автоматическому управлению*).

30 июня 1960 года Винер дал интервью «Литературной газете» под заголовком «Кибернетика и литература». В интервью он так рассказал о своей литературной деятельности и романе «Искуситель» [24]:

«В мои свободные часы я — писатель. Это не только отдых — формирование характеров под влиянием различных жизненных обстоятельств, судьбы людей всегда интересовали меня. Мой первый роман “Искуситель” вышел в ноябре 1959 года. Он посвящен типичному для американской действительности конфликту между идеалами ученого и его желанием сделать карьеру. Эпиграф романа: “Тем ученым, которые предпочитают искать истину, а не земные блага”. В центре повествования — судьба инженера Грегори Джеймса, родившегося в России, в Одессе, и до первой мировой войны эмигрировавшего в Америку. Я не случайно выбрал своим героем выходца из России. Дело в том, что Россия — страна мне очень близкая. Мой отец, Лев Винер, родился в Белостоке и в 1880 году эмигрировал в Америку. Всю свою жизнь он был горячим пропагандистом русской культуры. Преподавая русский язык в Гарвардском университете, он проделал поистине титаническую работу: перевел на английский язык многотомное собрание сочинений Льва Толстого...»

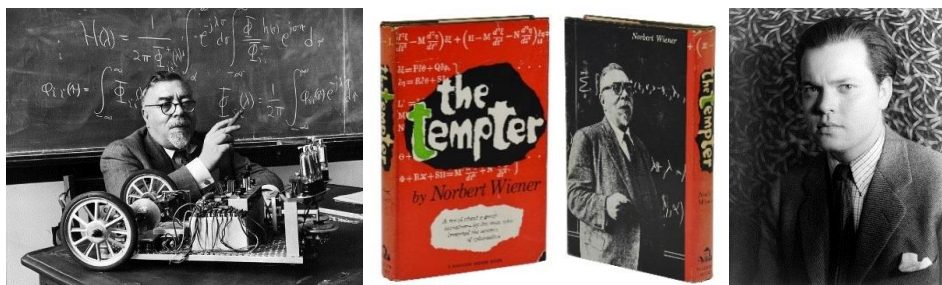


Рис. 10. Ноберт Винер — отец кибернетики. Общий вид издания романа «Искуситель», Ноберта Винера, вышедшего в США в 1959 г. Американский кинорежиссер Орсон Уэллс (1937 г.)

Fig. 10. Norbert Wiener is the father of cybernetics. General view of publication of novel “The Tempter” by Norbert Wiener, published in the USA in 1959. American filmmaker Orson Welles (1937)

¹⁵ Джордж Орсон Уэллс (англ. *George Orson Welles*, 06.05.1915—10.10. 1985) — американский кинорежиссер, актер, сценарист, который работал в театре, на радио и в кино. Наиболее примечательные картины режиссера: «Гражданин Кейн», «Печать зла», «Процесс» и «Леди из Шанхая». Уэллс занимает 16-ю строку в списке Американского института киноискусства среди величайших мужчин — легенд экрана классического голливудского кино.

В последние годы жизни Хевисайду было горько, вероятно, из-за того, что ему отказали в признании его авторства на индуктивную загрузку телефонной линии, на котором считал своим законным правом заработать.

По поводу всей этой ситуации автор монографии о Хевисайде [25] сказал: «...Он является филантропом и его задача — приносить пользу людям, даже тем, кто получает от этого выгоду». На самом деле Хевисайд был очень горд тем, что его идеи получили широкое признание как в физике, так и в электротехнике, из которой первоначально возникла его работа.

11. Заключение

По иронии судьбы Дж. Кэмпбелл проиграл битву за приоритет патента на нагрузочные катушки для телефонных линий, так как отложил подачу патентной заявки до завершения своих экспериментов. В то время как М. Пупин не разрабатывал катушки и не тестировал эту технологию на реальных телефонных линиях, как это сделал Кэмпбелл. Невзирая на это М. Пупин первым подал заявки на изобретение и получил два американских патента *US652230A* и *US652231A* на загрузку телефонной линии катушками индуктивности, что ознаменовало начало важной эры в области телефонии. На тот период времени не было ни одной проблемы в области теоретической электротехники и инженерной электротехники, которая потребовала бы таких больших знаний, технических способностей и усердия со стороны тех, кто занимался разработкой и применением индуктивных нагрузок.

Во многих случаях стоимость проводников большого диаметра, а также их чрезмерный вес и объем были бы практически непомерно высокими, если бы не экономия на размерах провода, которая обеспечивается изобретением Пупина.

Пупиновские катушки нашли особенно широкое применение на местных телефонных сетях США. В 1899 году была пущена в коммерческую эксплуатацию пупинизированная телефонная линия между Филадельфией и Чикаго (678 миль или 1222 км), а через два года компания AT&T построила самую длинную телефонную линию по той же технологии между Нью-Йорком и Денвером (1631 миль или 2625 км). К 1925 году примерно 1,25 миллиона нагрузочных катушек использовалось на более чем 3 миллионах км (1,8 миллиона миль) проводных цепей. Наличие катушек улучшает прохождение сигнала в диапазоне телефонных частот 0,3—3,4 кГц, однако на более высоких частотах прохождение сигнала значительно ухудшается, поэтому на телефонных линиях с использованием высокочастотных технологий катушки Пупина не устанавливаются.

На абонентских сетях России пупинизация применяется достаточно редко, например, современная сеть МГТС имеет около 5 % пупинизиро-

ванных кабелей. В связи с этим обязательным условием применения любых технологий *xDSL* (семейство технологий абонентского доступа типа «точка — точка») на существующих абонентских линиях является удаление пупиновских катушек. Это связано с тем, что пупиновские катушки резко нарушают однородность медной пары. В этом случае пара проводов практически превращается в идеальный фильтр нижних частот, затухание которого резко возрастает на высоких частотах [26].

В настоящее время в России в оперативном звене управления для обеспечения связи на большие расстояния используется пупинизированный кабель типа П-270, в полумуфты которого вмонтированы катушки индуктивности. Шаг пупинизации этого кабеля — 250 м, индуктивность катушки — 1,3 мГн, что позволяет его использовать в диапазоне до 60 кГц.

Нужно отметить, что без какой-либо формы *усиления электрического сигнала*, телефонная связь, даже с использованием нагрузочных катушек, была бы невозможна между далеко расположенными городами, в таких крупных странах, как Соединенные Штаты.

Список литературы

1. Пестриков В. М. Проблемы дальней телефонии на рубеже 19 и 20 веков и поиски их решения // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 1. С. 117—151.
2. Lagrange L. Recherches sur la nature et la propagation du son. Oeuvres de Lagrange. V. I. Paris, 1788. 512 p.
3. Pupin Michael. From immigrant to inventor. New York, London : Charles Scribner's sons. 1949. P. 189.
4. Лагранж Ж. Аналитическая механика. Т. I. М.—Л. : Гостехиздат, 1950. 594 с.
5. Lewis Campbell and William Garnett. The Life of James Clerk Maxwell. London : Macmillan & Co., 1882. 662 p.
6. Martin T. C. Francis Bacon Crocker. An Educator Who is Also an Inventor Engineer // Scientific American. January 13, 1912. Vol. 145, no. 2. P. 48.
7. Pupin M. I. Apparatus for Telegraphic or Telephonic Transmission. Patent US6519346A. Application filed December 14, 1893. Patented May 8, 1904.
8. Pupin M. I. On Electrical Oscillations of Low Frequency and their Resonance // American Journal of Science. Part 1. April 1893. Vol. 45, no. 268. P. 325—334. Part 2. May 1893. Vol. 45, no. 269. P. 420—429. Part 3. June 1893. Vol. 45, no. 270. P. 503—520.
9. Pupin M. I. Transatlantic communication by means of the telephone // Telephony. June 1901. Vol. 1, no. 6. P. 188—190.
10. Pupin M. I. Propagation of long electrical waves // Transactions of the AIEE. 1899. Vol. 16. P. 93—142.
11. Pupin M. I. Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves and Apparatus Therefore. Patent US652230A. Application filed December 14, 1899. Patented June 19, 1900.
12. Pupin M. I. Wave propagation over non-uniform electrical conductors // Transactions American Mathematical Society (AMS). July 1900. Vol. 1, no. 3. P. 259—286.

13. Jewett F. B. Dr. George A. Campbell // The Bell System Technical Journal. October 1935. Vol. 14, no. 4. P.554.
14. A. R. A Pioneer of Long-Distance Telephony // Nature. Oct. 1, 1938. Vol.142, no. 3596. P. 591.
15. Pupin M. I. Wave Propagation over Non-Uniform Cables and Long Distance AirLines // Transactions of the AIEE. 1900. Vol. 17. P. 445—507.
16. Brittain James E. The Introduction of the Loading Coil : George A. Campbell and Michael I. Pupin // Technology and Culture. January 1970. Vol. 11, no. 1. P. 52.
17. Pupin M. I. Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves. Patent US652231A. Application filed May 28, 1900. Patented June 19, 1900.
18. Crocker Francis B. “Pupinized” Telephone Lines // Scientific American Supplement. June 3, 1916. Vol. 81, no. 2109. P. 359.
19. Campbell G. A. On loaded lines in telephonic transmission // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. March 1903. Series 6. Vol. 5 (27). P. 313—330.
20. Hunt B. J. Oliver Heaviside A first-rate oddity // Physics Today. November 2012. P.48—54.
21. Wiener Norbert. The Tempter. New York : Random House. 1959. 242 p.
22. Винер Норберт — Искуситель.
URL: https://royallib.com/book/viner_norbert/iskusitel.html (29.11.2021).
23. Nahin P. J. Oliver Heaviside : The Life, Work, and Times of an Electrical Genius of the Victorian Age, 2nd ed. Baltimore : Johns Hopkins U. Press, 2002. P. 21.
24. Фет Я. И. Рассказы о кибернетике. Норберт Винер в Москве.
URL: <https://www.modernproblems.org.ru/science/214-cybernet.html?start=4> (29.11.2021).
25. Болотовский Б. М. Оливер Хевисайд. 1850—1925 / Отв. ред. акад. В. Л. Гинзбург. М. : Наука, 1985. 260 с.
26. Пупиновские катушки как источник проблем. Сайт компании «СвязьКомплект».
URL: <http://www.skomplekt.com/technology/reflect/reel.htm> (30.11.2021).

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.

Michael Pupin and Pupinization of Telephone Lines

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The scientific ways that led the American radio engineer Michael Pupin to the development of telephone technologies aimed at improving the quality of an audio signal when it is transmitted over long distances are considered. Pupin's important inventions in the field of long-distance telephony are investigated. His theories of using inductors to reduce the attenuation of the transmitted telegraph and telephone signal over the cable by artificially increasing its inductance are described. Attention is paid to the dispute between Pupin and Campbell in the primacy of the invention of load coils and its most significant consequences.*

Keywords: *long-distance telephone communication, Michael Pupin, Lagrange, analytical mechanics, loaded conductor, pupinization, patent rivalry between Pupin and Campbell.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Michael Pupin and Pupinization of Telephone Lines," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 260–293, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.20. (In Russ.).

References

- [1] V. M. Pestrikov, "Problems of Long-Distance Telephony at the Turn of the 19th and 20th Centuries and the Search for Their Solutions," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 117–151, 2022. (In Russ.).
- [2] L. Lagrange, *Recherches sur la nature et la propagation du son. Oeuvres de Lagrange*, vol. I, Paris, 1788.
- [3] M. Pupin, *From immigrant to inventor*. New York, London: Charles Scribner's sons. 1949.
- [4] J. Lagrange, *Analytical Mechanics*, vol. I, Moskow – Leningrag: Gostekhizdat, 1950. (In Russ.).
- [5] L. Campbell and W. Garnett. *The Life of James Clerk Maxwell*. London: Macmillan & Co. 1882.
- [6] T. C. Martin, "Francis Bacon Crocker," *Scientific American*, vol. 106, no. 2, pp. 43–43, Jan. 1912, doi: 10.1038/scientificamerican01131912-43.
- [7] M. I. Pupin, "Apparatus for Telegraphic or Telephonic Transmission." Patent US6519346A. Application filed December 14, 1893. Patented May 8, 1904.
- [8] ► M. I. Pupin, "Electrical oscillations of low frequency and their resonance," *American Journal of Science*, vol. s3-45, no. 268, pp. 325–334, Apr. 1893, doi: 10.2475/ajs.s3-45.268.325.
► M. I. Pupin, "On electrical oscillations of low frequency and their resonance," *American Journal of Science*, vol. s3-45, no. 269, pp. 420–429, May 1893, doi: 10.2475/ajs.s3-45.269.420.

- M. I. Pupin, "Electrical oscillations of low frequency and their resonance," *American Journal of Science*, vol. s3-45, no. 270, pp. 503–520, Jun. 1893, doi: 10.2475/ajs.s3-45.270.503.
- [9] M. I. Pupin, "Transatlantic communication by means of the telephone," *Telephony*, vol. 1, no. 6, pp. 188–190, June 1901.
- [10] M. I. Pupin, "Propagation of Long Electrical Waves," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XVI, pp. 91–142, 1899, doi: 10.1109/t-aiee.1899.4764066.
- [11] M. I. Pupin, "Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves and Apparatus Therefore." Patent US652230A. Application filed December 14, 1899. Patented June 19, 1900.
- [12] M. I. Pupin, "Wave propagation over non-uniform electrical conductors," *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 1, no. 3, pp. 259–286, 1900, doi: 10.1090/s0002-9947-1900-1500536-7.
- [13] F. B. Jewett, "Dr. George A. Campbell," *Bell System Technical Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 553–557, Oct. 1935, doi: 10.1002/j.1538-7305.1935.tb00701.x.
- [14] A. R., "The Collected Papers of George Ashley Campbell, Research Engineer of the American Telephone and Telegraph Company," *Nature*, vol. 142, no. 3596, pp. 591–591, Oct. 1938, doi: 10.1038/142591a0.
- [15] M. I. Pupin, "Wave Transmission over Non-Uniform Cables and Long-Distance Air-Lines," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XVII, pp. 445–512, 1900, doi: 10.1109/t-aiee.1900.4764144.
- [16] J. E. Brittain, "The Introduction of the Loading Coil: George A. Campbell and Michael I. Pupin," *Technology and Culture*, vol. 11, no. 1, pp. 36–57, 1970, doi: 10.2307/3102809.
- [17] M. I. Pupin, "Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves." Patent US652231A. Application filed May 28, 1900. Patented June 19, 1900.
- [18] F. B. Crocker, "'Pupinized' Telephone Lines," *Scientific American*, vol. 81, no. 2109supp, pp. 359–359, Jun. 1916, doi: 10.1038/scientificamerican06031916-359supp.
- [19] G. A. Campbell, "XXX. On loaded lines in telephonic transmission," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 5, no. 27, pp. 313–330, Mar. 1903, doi: 10.1080/14786440309462928.
- [20] B. J. Hunt, "Oliver Heaviside: A first-rate oddity," *Physics Today*, vol. 65, no. 11, pp. 48–54, Nov. 2012, doi: 10.1063/pt.3.1788.
- [21] N. Wiener, *The Tempter*. New York: Random House, 1959.
- [22] "Wiener Norbert – Tempter." URL: https://royallib.com/book/viner_norbert/iskusitel.html (29.11.2021)
- [23] P. J. Nahin, *Oliver Heaviside: The Life, Work, and Times of an Electrical Genius of the Victorian Age*, 2nd ed., Baltimore: Johns Hopkins U. Press, 2002.
- [24] Ya. I. Fet, *Tales about cybernetics. Norbert Wiener in Moscow* URL: <https://www.modernproblems.org.ru/science/214-cybernet.html?start=4> (29.11.2021). (In Russ.).
- [25] B. M. Bolotovskiy, *Oliver Heaviside. 1850–1925*. Ed. V. L. Ginzburg, Moscow: Nauka, 1985. (In Russ.).
- [26] "Pupin's coils as a source of problems." URL: <http://www.skomplekt.com/technology/reflect/reel.htm> (30.11.2021). (In Russ.).

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Том 5, № 2, 2022 г.

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

Физические науки (1.3)

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

История науки и техники (5.6.6)

Адрес редакции:

ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053

Тел. редакции: (8692) 41-77-41

<http://icrtjournal.com>

E-mail: icrt.mail@mail.ru

Отпечатано в типографии Printex

ул. Кулакова, д. 59а, Севастополь, 299011

Тел.: (8692) 46-47-44, (8692) 45-56-78

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии» обязательна.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

Издатель

ООО «Издательский центр РИОР»

ул. Полярная, д. 31в, стр. 1, Москва, 127214

(по договору № 66-22/ЭЗК-223 от 15.06.2022)

№ рег. СМИ: ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Главный редактор: Вольвач А. Е.

Подписано к печати 05.06.2022. Заказ 2201561. Дата выхода в свет: 11.09.2022. Тираж: 50 экз.
Свободная цена. Формат 64×90/16. Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 8,02
