



# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

**СВЧ - ТЕХНИКА**

ВЫПУСК 2 (541)

2019

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2(541)

2019

Издается с 1950 г.

*Главный редактор*

**д.т.н. А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);  
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);  
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **П.В. Куприянов**;  
д.т.н. **Н.А. Лябин**; д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;  
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;  
**В.П. Стебунов** (*ответственный секретарь*);  
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;  
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;  
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;  
к.ф.-м.н. **В.Н. Вьюгинов**, АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург;  
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;  
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;  
к.т.н. **П.П. Куцько**, ФГУП «МНИИРИП», г. Мытищи;  
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;  
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;  
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;  
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «НПП «Пульсар», г. Москва;  
д.т.н. **С.П. Морев**, АО «НПП «Торий», г. Москва;  
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;  
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;  
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2019 г.

# ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

## SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

---

Issue 2(541)

2019

Founded in 1950

---

*Editor-in-chief*

D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);  
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);  
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**;  
D.T.Sc. **N.A. Lyabin**; D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;  
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;  
**V.P. Stebunov** (executive secretary);  
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;  
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;  
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;  
C.Ph.M.Sc. **V.N. Vyuginov**, JSC «Svetlana-Elektronpribor», St. Petersburg;  
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, IPh SB RAS, Novosibirsk;  
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;  
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, FSUE «MNIIRIP», Mytishi;  
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;  
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;  
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;  
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «RPC «Pulsar», Moscow;  
D.T.Sc. **S.P. Morev**, JSC «RPC «Torij», Moscow;  
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;  
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;  
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate ПИИ № ФС 77-73640 dated September 7, 2018).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation the journal «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results nominated for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

---

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <i>От редакции</i> .....  | 6  |
| <b>Технология и материаловедение</b>  |    |
| <i>Панас А.И., Чигарев С.Г., Вилков Е.А., Шаталов А.С., Черкасов Д.А., Загорский Д.Л. – Создание массива нанопроволок с магнитными переходами для генерации излучения терагерцового диапазона</i> ..... | 8  |
| <i>Вашин С.А. – Методики снижения токов утечки в отпаянных ЭВП</i> .....  | 16 |
| <i>Слабченко В.С., Косенко М.С., Сериков Д.Д. – Удаление заусенцев на деталях из меди методом электролитно-химической обработки</i> .....   | 27 |
| <i>Сериков Д.Д., Слабченко В.С., Герольд И.В. – Получение отверстий профильным электродом на электроискровом прошивочном оборудовании</i> .....   | 32 |
| <b>Электровакуумные приборы</b>   |    |
| <i>Фурсаев М.А. – Частотная зависимость сопротивления резонаторной системы магнетрона и ее влияние на его работу в режиме синхронизации</i> .....   | 39 |
| <i>Каргин А.Н., Соколов А.М. – Аналитическая тепловая модель оксидного катода магнетрона</i> ..   | 44 |
| <b>Твердотельная электроника</b>  |    |
| <i>Данилин Н.С., Димитров Д.М., Батулин А.В., Булаев И.Ю. – Термопроектирование СВЧ-компонентов и электронных систем в корпусе</i> .....  | 51 |
| <i>Самохин С.А., Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Терёшкин Е.В., Федоров Н.А. – Малогабаритный опорный СВЧ-генератор на коаксиальном резонаторе</i> .....  | 58 |
| <b>Радиоэлектронные устройства</b>  |    |
| <i>Лысенко И.Е., Ткаченко А.В. – Моделирование конструкции интегрального МЭМС-переключателя емкостного типа для микроволновой области применений</i> .....  | 67 |
| <b>Медицинская электроника</b>  |    |
| <i>Казаринов К.Д., Баранова О.А., Щелконогов В.А., Чеканов А.В. – Экспериментальные результаты изучения эффектов КВЧ-излучения на межклеточные взаимодействия в плазме крови человека</i> .....         | 79 |
| <b>Экономика</b>  |    |
| <i>Мамонтова Е.В., Вершинин А.А. – Система менеджмента качества и управление рисками на предприятиях наукоемкого машиностроения</i> .....   | 87 |
| <b>Краткие сообщения</b>  |    |
| <i>Балыко И.А., Терёшкин Е.В., Дерябкина С.М., Балыко А.К., Спиричев И.И. – Движение физического и электрического маятника в поле центральных сил</i> .....   | 91 |
| <b>История</b>  |    |
| <i>Балыко А.К. – Нет предела исканий уму (интервью с В.Г. Калиной)</i> .....  | 96 |

## CONTENTS

|  |    |
|--|----|
| <i>From the editorial staff</i> .....  | 6  |
| <b>Technology and material science</b>   |    |
| <i>Panas A.I., Chigarev S.G., Vilkov E.A., Shatalov A.S., Cherkasov D.A., Zagorsky D.L.</i> – Creating an array of nanowires with magnetic transitions to generate terahertz radiation.....  | 8  |
| <i>Vashin S.A.</i> – Methods of reducing leakage currents in sealed-off EVD.....   | 16 |
| <i>Slabchenko V.S., Kosenko M.S., Serikov D.D.</i> – Deburring from copper parts by electrolytic-chemical treatment.....   | 27 |
| <i>Serikov D.D., Slabchenko V.S., Gerold I.V.</i> – Receiving holes with a profile electrode on an electro-spark piercing equipment.....   | 32 |
| <b>Electrovacuum devices</b>   |    |
| <i>Fursaev M.A.</i> – Frequency dependence of resonator system resistance of a magnetron and its influence on its work in synchronization mode.....  | 39 |
| <i>Kargin A.N., Sokolov A.M.</i> – Analytical thermal model of magnetron oxide cathode.....  | 44 |
| <b>Solid-state electronics</b>   |    |
| <i>Danilin N.S., Dimitrov D.M., Baturin A.V., Bulaev I.Yu.</i> – Thermal design of microwave components and electronic systems in a package.....   | 51 |
| <i>Samokhin S.A., Goryunov I.V., Iovdalskiy V.A., Tereshkin E.V., Fyodorov N.A.</i> – Small-size reference microwave oscillator on a coaxial resonator.....                                  | 58 |
| <b>Radioelectronic devices</b>   |    |
| <i>Lysenko I.E., Tkachenko A.V.</i> – Simulation of the design of integrated MEMS capacitive switch for microwave applications.....  | 67 |
| <b>Medical electronics</b>   |    |
| <i>Kazarinov K.D., Baranova O.A., Shchelkonogov V.A., Chekanov A.V.</i> – Experimental results of studying the effects of EHF-radiation on cell-cell interactions in human blood plasma..... | 79 |
| <b>Economics</b>   |    |
| <i>Mamontova E.V., Vershinin A.A.</i> – Quality management system and risk management in high-tech engineering enterprises.....  | 87 |
| <b>News in brief</b>   |    |
| <i>Balyko I.A., Tereshkin E.V., Deryabkina S.M., Balyko A.K., Spirichev I.I.</i> – The movement of physical and electric pendulum in the field of central forces.....                        | 91 |
| <b>History</b>   |    |
| <i>Balyko A.K.</i> – There is no limit for the seeking mind (interview with V.G. Kalina).....  | 96 |

## ОТ РЕДАКЦИИ



Александр Степанович Попов

*16 марта 2019 года исполнилось 160 лет со дня рождения великого русского ученого Александра Степановича Попова, посвятившего всю свою светлую жизнь созданию и развитию радио.*

*А. С. Попов родился в 1859 году в поселке Турьинские родники (ныне г. Краснотурьинск) Свердловской области. В 1882 г. после окончания физико-математического факультета Петербургского университета он начал работать в Кронштадтской минной школе, славившейся своим физическим кабинетом.*

*Величайший естествоиспытатель Майкл Фарадей в 1831 году открыл закон электромагнитной индукции. Позднее Джеймс Максвелл разработал математическую теорию электромагнитных явлений. Генрих Герц к 1889 г. нашел простейший способ возбуждения электромагнитных волн в пространстве и тем самым впервые экспериментально доказал их существование. Казалось бы, что эти три крупных ученых современности полностью закрыли проблему электромагнитных волн. В чем же тогда состоит*

*оригинальность мышления и новизна исследований нашего соотечественника?*

*Во-первых, никто из упомянутых и других ученых, занимавшихся исследованием электромагнитных волн, не высказал предположения о возможности использования их для передачи сообщений на расстояние. Впервые мир услышал об этом из уст А. С. Попова. В одной из своих лекций, прочитанной им в 1889 г. в Кронштадте на собрании минных офицеров, он сделал следующий важный вывод: «Человеческий организм не имеет еще такого органа чувств, который замечал бы электромагнитные волны в эфире. Если изобрести такой прибор, который заменил бы нам электромагнитные чувства, то его можно было бы применить и в передаче сигналов на расстояние».*

*Во-вторых, Александр Степанович самостоятельно изготовил для такой передачи недостающий прибор. Его изобретением стал приемник электромагнитных волн. После этого электромагнитные волны стало возможным не только получать, например, с помощью искрового передатчика, но и регистрировать, причем регистрировать именно те колебания, которые шли от передатчика. 7 мая 1895 года А. С. Попов продемонстрировал во время своего доклада на заседании физического отделения Русского физико-химического общества изобретенное им первое радиоприемное устройство, способное регистрировать проходящий сигнал. Этот день является днем открытия радио.*

*В-третьих, для увеличения дальности действия русский ученый предложил присоединить к приемнику провод. Такой провод стал первой радиоприемной антенной. Усовершенс-*

твоя все входящие в приемопередатчик элементы, А. С. Попов в 1897 году установил связь на расстоянии 5 км, а когда в 1900 году броненосец русского флота «Генерал-адмирал Апраксин» сел на камни в Балтийском море, по предложению Александра Степановича и под его руководством была организована радиосвязь, обеспечивающая работы спасательной экспедиции. В это время была установлена радиосвязь на расстоянии 50 км и передано 400 радиограмм. После успешного проведения операции император Николай II распорядился выдать А. С. Попову премию в размере 33 тыс. руб. Для сравнения отметим, что на свои исследования ученый получал не более 2 тыс. руб. в год.

Уже только эти изобретения А. С. Попова стали гордостью российской науки и выдвинули Александра Степановича в число самых выдающихся людей современности.

Но гений А. С. Попова не имел границ. Во время проведения опытов на море было обнаружено нарушение радиосвязи между двумя кораблями. Александр Степанович объяснил это наличием отражений между металлическими корпусами кораблей и высказал предположение о возможности использования этого явления в целях радионавигации. Много лет спустя явление отражения радиоволн послужило основой для новой области радиотехники – радиолокации.

А. Попов скоропостижно скончался 13 января 1906 года.

Лучшим памятником великому русскому ученому, горячему патриоту своей Родины, изобретателю радио – Александру Степановичу Попову стали те успехи, которые достигнуты славными коллективами отечественных предприятий радиоэлектроники и будут приумножаться в будущем.

Разработчики, конструкторы, технологи, инженеры, изобретатели НПП «Исток» считают великого русского ученого А. С. Попова своим гениальным «прародителем».



# ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 537.862

## СОЗДАНИЕ МАССИВА НАНОПРОВОЛОК С МАГНИТНЫМИ ПЕРЕХОДАМИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

А. И. Панас<sup>1</sup>, С. Г. Чигарев<sup>2</sup>, Е. А. Вилков<sup>2</sup>, А. С. Шаталов<sup>3</sup>,  
Д. А. Черкасов<sup>3</sup>, Д. Л. Загорский<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

<sup>2</sup>ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

<sup>3</sup>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Москва

<sup>4</sup>Университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва

Методом матричного синтеза в порах трековых мембран были получены массивы идентичных нанопроволок с магнитными переходами «железо-никель» и «никель-кобальт». На их основе создан опытный макет спин-инжекционного излучателя. При пропускании тока через массив нанопроволок зафиксировано возбуждение электромагнитного излучения, которое, по мнению авторов, происходит за счёт изменения спин-энергетического состояния электронов. Изучен спектр наблюдаемого излучения. Показано, что излучение имеет нетепловую природу. Полученные результаты говорят о возможности создания на основе исследуемых структур источников электромагнитных колебаний в диапазоне 16...20 ТГц. В излучателях на основе подобных структур с высокой поверхностной плотностью нанопроволок ( $10^8 \text{ см}^{-2}$ ), имеющих малый диаметр (около десятков нанометров), в перспективе можно рассчитывать на существенное увеличение мощности излучаемого сигнала, так как каждую отдельно взятую нанопроволоку можно рассматривать как отдельный излучатель, а всю структуру – как систему параллельно связанных излучателей ТГц-сигнала.

*КС: терагерцовое излучение, двухкомпонентные нанопроволоки, матричный синтез, магнитный переход, инжекция спинов током, спиновое состояние, спин-инжекционный излучатель*

## CREATING AN ARRAY OF NANOWIRES WITH MAGNETIC TRANSITIONS TO GENERATE TERAHERTZ RADIATION

A. I. Panas<sup>1</sup>, S. G. Chigarev<sup>2</sup>, E. A. Vilkov<sup>2</sup>, A. S. Shatalov<sup>3</sup>,  
D. A. Cherkasov<sup>3</sup>, D. L. Zagorsky<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

<sup>2</sup>FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

<sup>3</sup>FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Moscow

<sup>4</sup>Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow

Arrays of identical nanowires with «iron – nickel» and «nickel-cobalt» magnetic transitions were obtained by matrix synthesis method in the pores of the track membranes. An experimental prototype of a spin-injection radiator was created on their basis. When current is passed through the array of nanowires, electromagnetic radiation is excited, which, according to the authors, occurs due to a change in the spin-energy state of electrons. The spectrum

of the observed radiation was studied. It is shown that radiation has a non-thermal nature. The obtained results suggest that it is possible to create sources of electromagnetic oscillations in the range 16...20 THz on the basis of the structures under study. In radiators based on similar structures with a high surface density of nanowires ( $10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) having a small diameter (about tens of nanometers), in the future we can count on significant increase in the power of the radiated signal, since each separately taken nanowire can be considered as a separate radiator and the whole structure – as a system of parallel-connected radiators of THz signal.

*Keywords: terahertz radiation, two-component nanowires, matrix synthesis, magnetic transition, injection of spins by current, spin state, spin-injection radiator*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что на шкале электромагнитных волн терагерцовый диапазон лежит между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазоном. До недавнего времени излучение терагерцового диапазона практически не использовалось. Однако в последние годы этот диапазон частот начал привлекать всё возрастающее внимание. Объясняется это, прежде всего, широкими потенциальными возможностями, обусловленными уникальными особенностями данного излучения. Это излучение не является ионизирующим (в отличие от рентгеновского) и может с успехом применяться в медицине и биологии. Кроме того, частоты излучения соответствуют частотам, необходимым для детектирования наркотических и взрывоопасных веществ, что обуславливает возможность применения их в системах безопасности. Потенциально широкие рабочие полосы дают возможность создания суперскоростных систем связи, а длины волн, соизмеримые с типовыми размерами микромира, интересны для решения различных материаловедческих проблем [1]. Однако отсутствие удобных в эксплуатации источников ТГц-излучения осложняет использование этого диапазона в практических целях.

В этой связи весьма актуальны исследования по поиску новых научно-технических и технологических решений, связанных с разработкой устройств излучения и приёма терагерцовых сигналов. В последние 10...15 лет преимущественно в России развивается новое направление исследований, связанное с эффектом возбуждения терагерцовых сигналов (в диапазоне частот 3...40 ТГц) при протекании токов большой плотности ( $10^5 \dots 10^7 \text{ A/cm}^2$ ) в магнитных переходах, сформированных контактирующими слоями ферромагнетиков и антиферромагнетиков. Начало исследованиям положили теоретические работы [2–4], предсказавшие возможность спин-инжекционного излучения в указанных структурах и объяснившие эффект. Последующие экспериментальные работы [5, 6] подтвердили теоретические предсказания.

Дальнейшие работы в этом направлении связаны, в частности, с увеличением мощности излучения. Убедительные результаты были получены в [7–9] при помещении источника терагерцового излучения (излучателя) в резонатор с положительной обратной связью подобно лазерам. Показано, что такой подход позволяет увеличить интенсивность сигнала. Другой подход связан с увеличением количества излучателей, что также приводит к увеличению мощности излучения. Этому направлению и посвящена настоящая работа. Основной её идеей является создание и использование структур с массивом параллельных наноразмерных проволок, каждая из которых содержит магнитные переходы.

В данной статье представлены первые результаты работ по созданию спин-инжекционного излучателя ТГц-диапазона на базе структуры с массивом нанопроволок и магнитными переходами.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ МАССИВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРОВОЛОК

Одним из способов получения структуры с массивом нанопроволок (НП) является матричный синтез. Суть метода заключается в заполнении наноразмерных пор в одном материале (матрице) другим (требуемым) материалом [10]. И матрица, и вещество, которым заполняют поры, и сам метод заполнения могут быть совершенно различными. В настоящей работе используется распространённый вариант матричного синтеза: в качестве матрицы используется трековая мембрана, поры которой заполняются металлом, для чего используется метод гальванического (электролитического) осаждения. Процесс состоит из двух основных этапов, что позволяет направленно, точно и с достаточной воспроизводимостью регулировать его параметры.

В качестве матрицы используется трековая мембрана (полимерная плёнка с набором идентичных сквозных отверстий). Известно, что такие мембраны получают путём облучения полимерной плёнки высокоэнергетическими ионами (на ускорителе) и последующего химического вытравливания образованных латентных треков. Такая технология даёт, в частности, возможность получения нанопроволок, состоящих из нескольких (чередующихся) слоёв различных металлов (сплавов) [11–13]. Получаемые при этом структуры могут обладать рядом уникальных свойств. Так, было обнаружено, что образцы с чередованием достаточно тонких слоёв магнитного и немагнитного металлов обладают гигантским магнитосопротивлением (ГМС) [14, 15]. Такие структуры могут применяться в качестве магнитных сенсоров и датчиков. Отметим, что авторы [16] синтезировали слоистые Co/Cu НП двумя методами: «однованновым» и «двухванновым». Был сделан вывод о том, что в образцах из НП, полученных однованновым методом, эффект ГМС имеет большее значение. Особенности спинового переноса в гетероструктурах Co/Cu НП были рассмотрены в [17].

Другая возможность – это синтез НП с чередованием слоёв, обладающих различными магнитными свойствами: ферромагнетик-ферромагнетик, ферромагнетик-антиферромагнетик. Возможность применения таких НП в спинтронике обсуждалась в ряде публикаций. Так, в серии работ [18, 19] рассмотрены особенности вихревых доменных стенок. В [19] рассмотрено движение доменных стенок в НП из слоёв Co/Ni, вызванное спин-поляризованным током. Такой ток может вызывать и обратимое движение доменных стенок. Авторы считают также, что спин-поляризованным током (очевидно, меньшей величины) можно и контролировать положение стенок. Уникальные особенности массивов таких НП стимулировали вышеупомянутую идею о создании на их основе спин-инжекционных излучателей. Для этого необходимо синтезировать массив НП, каждая из которых состоит из чередующихся слоёв магнитных металлов группы железа.

В получении таких структур важнейшую роль играет процесс электроосаждения. Известно, что многокомпонентные НП обычно синтезируют методом электроосаждения из электролита, содержащего ионы необходимых металлов. При проведении гальванического процесса последовательное осаждение участков различного состава достигается путём изменения потенциала процесса. Так, при малом потенциале осаждается только элемент с низким равновесным потенциалом. При повышении потенциала осаждаются уже оба элемента. Однако содержание первого можно значительно уменьшить за счёт уменьшения его концентрации в растворе. Описанный метод наиболее распространён и называется однованновым, поскольку многокомпонентный электролит содержится в одной ячейке, в которой и проводится электроосаждение.

Существует и другой подход – двухванновый метод, при котором используются два электролита и каждый следующий металлический слой выращивается в «своём» электролите. Отметим, что в этом методе существенно улучшается качество формируемых слоёв по сравнению с традиционно используемым однованновым методом. Вместе с тем возникает ряд проблем, связанных с многократной сменой электролита.

В работе в качестве ростовой матрицы использовалась трековая мембрана, изготовленная в ОИЯИ (г. Дубна). Мембрана представляла собой тонкую полимерную (ПЭТФ) плёнку толщиной 10 мкм с множеством идентичных сквозных цилиндрических пор (поверхностная плотность  $10^8/\text{см}^2$ ) диаметром порядка 100 нм. После аттестации на одну из сторон мембраны наносился (методом термического распыления в вакууме) тонкий слой меди, который затем служил контактным электродом. Полученная мембрана, с металлизированной стороной, помещалась в гальваническую ячейку. В ходе гальванического процесса ионы металла из раствора осаждались в поры мембраны, формируя «реплики» – «слепки» поровых каналов. В работе было проведено сравнение двух способов получения НП, состоящих из чередующихся слоёв двух металлов. Показано, что двухванновый метод даёт лучшие результаты, по крайней мере, при получении массива НП, состоящих только из двух частей и соответственно из одного перехода. Очевидно, что в этом случае требуется лишь однократная смена электролита, а значит, привнесённые дефекты будут минимальными.

В работе при получении Fe/Ni НП использовались следующие электролиты:

– для осаждения слоя Fe использовался электролит состава:  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 45 г/л;  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 120 г/л; стабилизирующие добавки (до получения  $\text{pH} = 2,3$ ). Режим осаждения:  $T = 23,7^\circ\text{C}$ ,  $U = 1\text{ В}$ ,  $t = 120\text{ с}$ ;

– для осаждения слоя Ni применялся электролит состава:  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 250 г/л;  $\text{NiCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 30 г/л;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 30 г/л. Режим:  $T = 24,8^\circ\text{C}$ ,  $U = 1\text{ В}$ ,  $t = 95\text{ с}$ .

Для Ni/Co НП применялись электролиты следующего состава:

– для осаждения слоя Ni применялся электролит состава:  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 250 г/л;  $\text{NiCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 30 г/л;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 30 г/л. Режим:  $T = 25,2^\circ\text{C}$ ,  $U = 1\text{ В}$ ,  $t = 90\text{ с}$ ;

– для осаждения слоя Co применялся электролит состава:  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 320 г/л;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 40 г/л. Режим:  $T = 23,2^\circ\text{C}$ ,  $U = 1\text{ В}$ ,  $t = 70\text{ с}$ .

Именно с использованием двухваннового метода были получены структуры с комбинациями в каждой отдельно взятой поре железа и никеля, которые далее и исследовались в работе. На рис. 1 представлен пример электронно-микроскопического изображения указанной структуры из нескольких пар слоёв после отделения массива нанопроволок от ростовой матрицы.

Для создания условий спин-инжекционного возбуждения ТГц-излучения в полученных магнитных переходах необходимо обеспечить протекание тока через полученный массив «двухкомпонентных» НП. Для этого на обеих поверхностях мембран с «внедрёнными» НП

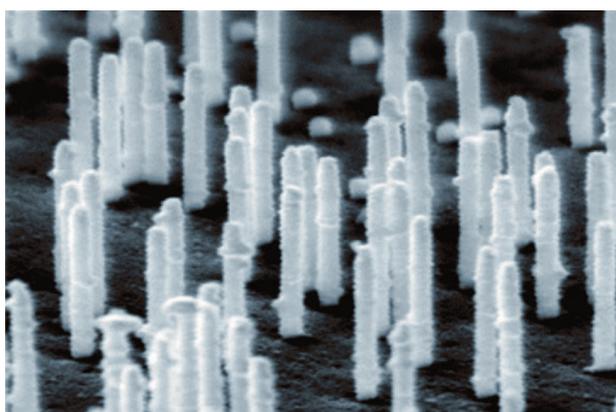


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры с массивом НП после удаления полимерной ростовой матрицы

должны быть нанесены токопроводящие слои металла, контактирующие с каждой из НП. Слои металла выполняют роль контактных площадок. Один из контактных слоёв (слой меди толщиной в несколько микрон) наносился на одну из поверхностей мембраны перед осаждением металлов в поры. Другой слой наносился на вторую сторону полимерной плёнки после формирования в ней НП. Для обеспечения регистрации ТГц-излучения этот слой должен быть полупрозрачным для него, что достигалось выполнением этого слоя из золота толщиной порядка 20 нм, нанесённого плазменным распылением. К обоим металлическим слоям подсоединялись массивные токоподводящие электроды.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки, на которой проводились измерения амплитудных и вольт-амперных характеристик при протекании тока сквозь структуру с массивом нанопроволок, представлена на рис. 2. Методика измерения заключалась в следующем. Синусоидально модулированный ток с частотой  $\omega = 6$  Гц от блока питания ГСС 3-123 подавался на излучатель. При превышении током пускового значения, в излучателе возбуждался периодически модулированный сигнал с частотой  $2\omega$ . Частота модуляции сигнала определялась согласно паспортным требованиям для оптоакустического приемника GC-1 фирмы «ТИДЕКС», который использовался в качестве детектора регистрируемого сигнала. Модулированный сигнал выпрямлялся и усиливался широкополосным выпрямителем-усилителем. Выпрямленный сигнал подавался на один из каналов аналого-цифрового преобразователя и далее на персональный компьютер. Величина тока и напряжения, подаваемого на излучатель, после аналого-цифрового преобразования также регистрировались с помощью компьютера. Таким образом, регистрировались как осциллограммы амплитуды сигнала во времени, так и вольт-амперные характеристики излучателя.

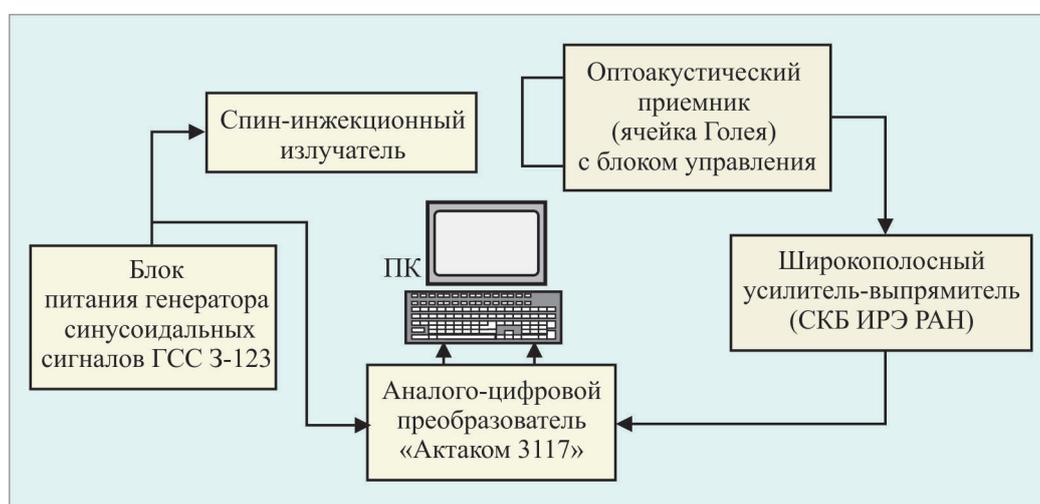


Рис. 2. Схема опико-акустической установки (стрелками указаны направления передачи сигнала)

Исследование спектра излучения спин-инжекционного излучателя с массивом НП было проведено в два этапа. Первоначально диапазон излучения сигнала в пределах длин волн 8...20 мкм был определен с помощью фильтров ТГц-диапазона фирмы «ТИДЕКС». На следующем этапе

исследовалась зависимость спектров излучаемого сигнала от тока через образец с массивом НП. Измерения проводились на инфракрасном Фурье-спектрометре Vertex 80V фирмы Bruker. Были измерены спектры сигналов при разных значениях тока. Результаты этого измерения представлены на рис. 3, где мощность излучаемого сигнала  $W$  (ось ординат) соответствует приведенным относительным значениям, а по горизонтальной оси отложена длина волны  $\lambda$ , мкм.

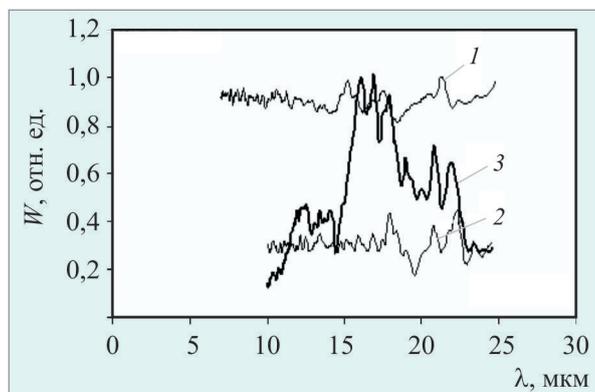


Рис. 3. Спектр излучаемого сигнала ( $W$  – мощность сигнала в относительных единицах;  $\lambda$  – длина волны излучаемого сигнала, мкм) в зависимости от интегральной величины тока, протекающего через экспериментальный макет:

1 – спектр глобара (тепловой инфракрасный источник); 2 – 30 мА; 3 – 82 мА

Как и в предыдущих работах авторов [5–8], здесь также наблюдается ярко выраженный пороговый эффект по протекающему через экспериментальный образец интегральному току. При превышении им значения в 68 мА в спектре начинают резко проявляться спектральные (излучательные) компоненты в диапазоне частот 16...18 ТГц. При дальнейшем увеличении тока мощность излучения увеличивается, оставаясь в пределах указанного частотного диапазона. Такая частотная избирательность резко отличается от тепловых спектров (кривые 1, 2) в исследуемом диапазоне и указывает на нетепловой характер излучения. Как видно из рис. 3, при сравнительно малых значениях тока (кривая 2) интенсивность излучения в исследуемом диапазоне длин волн практически равномерно распределена по всему измеряемому диапазону. Такой спектр качественно соответствует приведенному относительному спектру, измеренному для теплового излучателя глобара (кривая 1). Однако по мере увеличения тока (кривая 3) основная доля генерируемой мощности концентрируется в сравнительно локальном диапазоне длин волн, оцениваемом в пределах 15...17 мкм по уровню 3 дБ. Наблюдение относительно широкополосного сигнала не противоречит общим представлениям о спин-инжекционном механизме излучения, так как, согласно [6], при отсутствии в излучателе резонансной системы, стабилизирующей частоту излучения, излучение происходит за счет косых квантовых переходов между энергетическими уровнями разных спиновых энергетических подзон. При этом энергии квантовых переходов колеблются в некотором диапазоне энергий, определяемом разностью энергий квазиуровней Ферми спиновых энергетических подзон [9]. Такой разброс энергии квантовых переходов и обеспечивает широкополосность излучения. Тем не менее, наблюдение излучения в относительно локальной области длин волн, при превышении током некоторого пускового значения, можно расценивать как присутствие нетеплового излучения при протекании тока через структуру с массивом НП.

#### 4. ВЫВОДЫ

В работе впервые экспериментально показана возможность использования массива НП в качестве основных элементов спин-инжекционных излучателей. Получена устойчивая генерация сигнала в диапазоне 16...20 ТГц. Подробно описана технология получения НП. К сожалению, не удалось оценить мощность излучаемого сигнала, что делает актуальным продолжение исследований в этом направлении.

Работы по синтезу НП и микроскопии выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. В части работ использовалось оборудование ЦКП ИК РАН. Авторы благодарны проф. П. Ю. Апелю (ОИЯИ, г. Дубна) за предоставление образцов трековых мембран и И. М. Долуденко за получение СЭМ-изображений НП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Dhillon, S. S.** The 2017 terahertz science and technology roadmap / S. S. Dhillon, M. S. Vitiell, E. H. Linfield, A. G. Davies, M. C. Hoffmann, J. Booske, C. Paoloni, M. Gensch, P. Weightman, G. P. Williams, E. Castro-Camus, D. R. S. Cumming, F. Simoens, I. Escorcia-Carranza, J. Grant, S. Lucyszyn, M. Kuwata-Gonokami, K. Konishi, M. Koch, C. A. Schmuttenmaer, T. L. Cocker, R. Huber, A. G. Markelz, Z. D. Taylor, V. P. Wallace, J. A. Zeitler, J. Sibik, T. M. Korter, B. Ellison, S. Rea, P. Goldsmith, K. B. Cooper, R. Appleby, D. Pardo, P. G. Huggard, V. Krozer, H. Shams, M. Fice, C. Renaud, A. Seeds, A. Stohr, M. Naftaly, N. Ridler, R. Clarke, J. E. Cunningham, M. B. Johnston // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 50. – P. 1 – 49.
2. **Гуляев, Ю. В.** Инжекция спинов током в магнитных переходах металл-металл / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Э. М. Эпштейн, Р. Дж. Эллот // *Радиотехника и электроника.* – 2003. – Т. 48, № 3. – С. 1030 – 1044.
3. **Kadigrobov, A.** Novel laser based on magnetic tunneling / A. Kadigrobov, R. I. Shekhter, M. Jonson // *ФНТ.* – 2005. – Т. 31, вып. 3-4. – С. 463 – 470.
4. **Гуляев, Ю. В.** Переключение магнитного перехода совместным действием импульса тока и магнитного поля. Численное моделирование / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн // *Письма в ЖТФ.* – 2011. – Вып. 4. – С. 16 – 22.
5. **Гуляев, Ю. В.** Спин-инжекционное терагерцовое излучение в магнитных переходах / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, И. В. Маликов, Г. М. Михайлов, А. И. Панас, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн // *Письма в ЖЭТФ.* – 2011. – Т. 93, вып. 5. – С. 289 – 292.
6. **Гуляев, Ю. В.** Инжекция спинов током и терагерцовое излучение в ферромагнитных переходах / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, И. В. Маликов, Г. М. Михайлов, А. И. Панас, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн // *ДАН.* – 2011. – Т. 438, № 1. – С. 41 – 43.
7. **Гуляев, Ю. В.** Спин-инжекционное стимулированное излучение терагерцовых волн в магнитных переходах / Ю. В. Гуляев, Е. А. Вилков, П. Е. Зильберман, Г. М. Михайлов, Ф. В. Черных, С. Г. Чигарев // *Письма в ЖЭТФ.* – 2014. – Т. 99, вып. 9. – С. 591 – 594.
8. **Гуляев, Ю. В.** Стимулированное терагерцовое излучение / Ю. В. Гуляев, Е. А. Вилков, П. Е. Зильберман, Г. М. Михайлов, Ф. В. Черных, С. Г. Чигарев // *Радиотехника и электроника.* – 2015. – Т. 60, № 9. – С. 963 – 966.
9. **Вилков, Е. А.** Резонансные эффекты спин-инжекционного излучения терагерцовых волн в наноразмерных магнитных переходах / Е. А. Вилков, Н. А. Максимов, Г. М. Михайлов, А. И. Панас, А. В. Черных, С. Г. Чигарев // *Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника.* – 2018. – Вып. 2. – С. 6 – 12.
10. **Martin, C. R.** Nanomaterials: a membrane based synthetic approach / C. R. Martin // *Science.* – 1994. – Vol. 266. – P. 1961 – 1966.
11. **V'azquez, A. M.** Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications / Ed. A. M. V'azquez. – Woodhead Publishing, Amsterdam: Elsevier, 2005. – 847 p.

12. **Ohgai, T.** Electrodeposited nanowires and their applications / T. Ohgai; ed. N. Lupu. – Croatia: InTech, 2010. – P. 61 – 85.
13. **Давыдов, А. Д.** Темплатное электроосаждение металлов (обзор) / А. Д. Давыдов, В. М. Волгин // Электрохимия. – 2016. – Т. 52, № 9. – С. 905 – 933.
14. **Piroux, L.** Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires / L. Piroux, J. M. George, J. F. Despres, C. Leroy, E. Ferain, R. Legras, K. Ounadjela, A. Fert // Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol. 65. – P. 2484.
15. **Blondel, A.** Giant magnetoresistance of nanowires of multilayers / A. Blondel, J. P. Meier, B. Doudin, J.-Ph. Ansermet // Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol. 65. – P. 3019.
16. **Blondel, A.** Comparative study of the magnetoresistance of electrodeposited Co/Cu multilayered nanowires made by single and dual bath techniques / A. Blondel, B. Doudin, J. P. Ansermet // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1997. – Vol. 165, No 3. – P. 34 – 37.
17. **Xiaobo, H.** Magnetoresistance and spin transfer torque in electrodeposited Co/Cu multilayered nanowire arrays with small diameters / H. Xiaobo, T. Liwen, C. Haeseok, J. H. Bethanie // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105. – P.07d128.
18. **Ivanov, Yu. P.** Single crystalline cylindrical nanowires – toward dense 3D arrays of magnetic vortices / Yu. P. Ivanov, A. Chuvilin, L. G. Vivas, J. Kosel, O. Chubukalo-Fesenko, M. Vazques // Nature. Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 23844.
19. **Ivanov, Yu. P.** Direct observation of current-induced motion of a 3D vortex domain wall in cylindrical nanowires / Yu. P. Ivanov, A. Chuvilin, S. Lopatin, H. Mohammed, J. Kosel // ACS applied materials and interfaces. – 2017. – Vol. 9. – P.16741.

Статья поступила 2 апреля 2019 г.

## НОВЫЕ КНИГИ

**ДЖУРИНСКИЙ К. Б. Радиочастотные соединители, адаптеры и кабельные сборки / К. Б. Джуринский. – М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. – 400 с.**

В настоящем издании систематизированы и обобщены данные по современным радиочастотным соединителям, адаптерам и кабельным сборкам отечественных и зарубежных компаний. На большом фактическом материале рассмотрены конструкция и технические параметры соединителей компаний Юго-Восточной Азии (Тайвань, Китая, Южной Кореи, Японии). Приведены данные по изоляционным материалам и фазостабильным кабельным сборкам.

Книга содержит необходимые справочные материалы по зарубежным радиочастотным соединителям и кабелям и предназначена для специалистов, занимающихся конструированием современных радиоэлектронных средств. Она может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам радиотехнических специальностей.

УДК 537.521.1

## МЕТОДИКИ СНИЖЕНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ В ОТПАЯННЫХ ЭВП

С. А. Вашин

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

Показан способ устранения токов утечки в ЭВП, связанных со значительным содержанием поверхностных газов. Разработаны методики определения и снижения токов утечки изоляторов отпаянных приборов. Определен критерий высоковольтной тренировки для наружных цилиндрических изоляторов ЭВП, имеющих внутреннее напыление. Разработана методика тренировки при повышенном давлении остаточных газов. Оптимизирован способ одновременной высоковольтной тренировки мощных многолучевых клистронов с целью устранения токов утечки вакуумного промежутка сетка – катод.

*КС: отпаянный ЭВП, ток утечки, высоковольтная тренировка*

## METHODS OF REDUCING LEAKAGE CURRENTS IN SEALED-OFF EVD

S. A. Vashin

*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

The way of eliminating leakage currents in EVDs connected with a significant content of surface gasses is shown. Techniques for determining and reducing leakage currents of sealed-off insulators have been developed. The criterion of high-voltage training for EVD external cylindrical insulators having internal sputtering was determined. The method of training at increased pressure of residual gasses was developed. The method of simultaneous high-voltage training of high-power multiple-beam klystrons has been optimized in order to eliminate leakage currents of a vacuum gap grid – cathode.

*Keywords: sealed-off EVD, leakage current, high-voltage training*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Паразитные токи между электродами ЭВП, протекающие при приложении к ним электрического напряжения, называют токами утечки [1]. Ток электрических зарядов в вакууме возможен при наличии носителей зарядов, которыми являются движущиеся электроны и ионы. Движение зарядов определяется начальной скоростью, а также действующими на них магнитными и электрическими полями. Если концентрация их велика, то помимо внешнего поля необходимо учитывать и взаимодействия между ними, которые могут изменить характер движения этих зарядов [2].

Повышение тока утечки, как правило, является предвестником пробоя, последствиями которого могут быть ухудшение вакуумных, эмиссионных параметров и выход прибора из строя [3]. Кроме того, например, для некоторых ЭВП появление токов более  $10^{-11} \dots 10^{-13}$  А уже является нарушением вакуумной электроизоляции [4–7]. Дефектные приборы, прошедшие откачку и имеющие токи утечки, превышающие допустимые значения, составляют 10...15 % от

общего числа ЭВП. Одним из эффективных способов снижения токов утечки является тренировка пробоями с использованием источников постоянного напряжения. Во время пробоев с большей вероятностью происходит разрушение автоэмиссионных центров, которые являются основными причинами образования проводимости вакуумных промежутков ЭВП [1, 3, 6]. Природа токов утечки разнообразная, поэтому необходимо уметь определять и разделять эти токи по их видам с целью эффективной борьбы с ними.

Целью работы является разработка эффективных методик, снижающих и определяющих токи утечки вакуумных промежутков отпаянных приборов.

## 2. МЕТОДИКИ СНИЖЕНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ В ОТПАЯННЫХ ЭВП

Ионная составляющая тока утечки может образовываться разными путями: за счет электронной бомбардировки газов и паров; поверхностной ионизации легкоионизируемых примесей; ионизации остаточных газов рентгеновским излучением. Доля тока ионной составляющей невелика при напряженности поля менее  $2 \cdot 10^4$  В/см и обычно возрастает с ростом напряженности поля, приложенного на вакуумный промежуток, при этом ток электронов в 3...8 раз выше ионного в случае протекания микрозарядов [6, 7].

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ионной составляющей изучена мало, она более равномерна по поверхности электрода и может влиять на характеристики предпробойного тока. В работе [8] показано, что при небольшой напряженности поля ток имеет вид микрозарядов, которые при росте напряжения переходят в непрерывный ток. При этом ионная составляющая ВАХ имеет линейную зависимость [9]. Также необходимо учитывать процессы содержания газов на поверхностях электродов, протекающие в порах [9]. В работе [10] проведено исследование, показывающее возрастание токов утечки после выдержки прибора без высокого напряжения (в выключенном состоянии), даже если после высоковольтной тренировки он составлял 0 мА. При этом величина тока возрастала с учетом времени выдержки ЭВП, а после подачи высокого напряжения ток возвращался к первоначальному значению (0 мкА). Данный процесс сопровождался газовой выделением с электрода прибора и зависел от времени его выдержки в выключенном состоянии [10]. Существуют еще работы [11], показывающие изменение газосодержания поверхностей прибора от времени выдержки, при этом давление остаточных газов в приборе остается не выше  $10^{-7}$  Па.

Ионная составляющая тока утечки в большей степени проявляется в приборах с аномально высоким содержанием газов на поверхностях. В таких приборах фиксируется повышение давления газов до  $1,6 \cdot 10^{-4}$  Па, величина которого не зависит от времени выдержки ЭВП без откачки встроенным магнитным электроразрядным насосом (НЭМ) (от 12 до 36 ч), что свидетельствует о том, что ЭВП не имеет течей. Кроме того, величина тока утечки во время подачи высокого напряжения на вакуумный промежуток снижается с уменьшением давления остаточных газов, фиксируемого по току НЭМ [12]. Единственным способом восстановления таких приборов, имеющих значительные токи утечки, является дополнительное обезгаживание прибора при температурах 100...150 °С [13]. В случае, если процессы газовой выделенной происходят непосредственно в пушке прибора, достаточным условием обезгаживания является долгая его выдержка (порядка 300 мин) с включенными подогревателем катода и НЭМ. Максимальное давление газов в таких отпаянных ЭВП во время обезгаживания может достигать  $3,2 \cdot 10^{-2}$  Па

при включении накальной цепи подогревателя катода [12]. Аналогичным способом можно избавляться не только от повышенного газосодержания внутри ЭВП, но и от металлических или полупроводниковых включений, образующихся во время сильных пробоев или других физико-химических процессов обычно в области катодно-сеточного узла пушки (рис. 1).

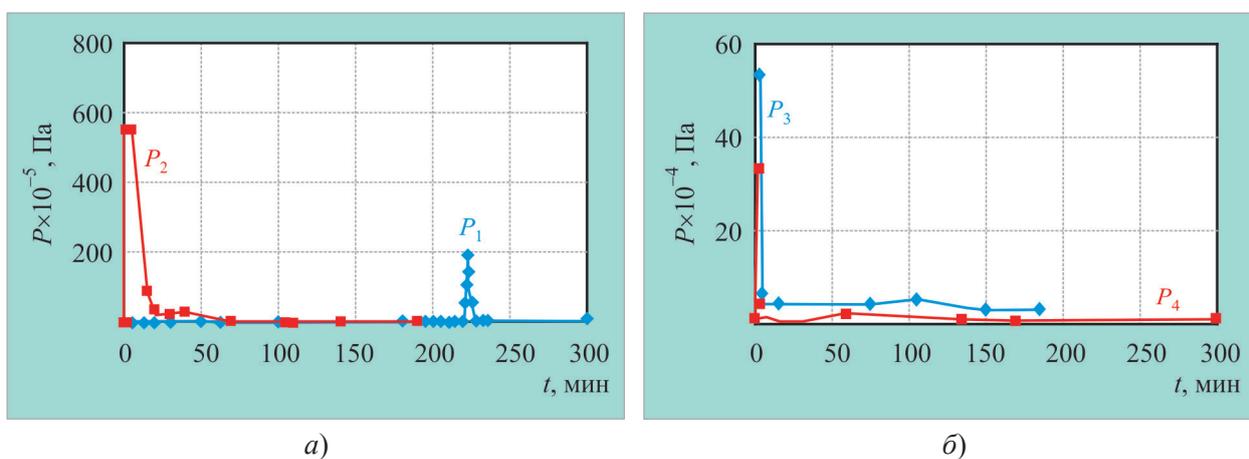


Рис.1. Изменение давления газов в отпаянном ЭВП при установке рабочего режима подогревателя катода:

$P_1$  – первое включение;  $P_2$  – второе включение после 360 ч выдержки ЭВП в выключенном состоянии;  $P_3$  – третье включение после 96 ч выдержки в выключенном состоянии;  $P_4$  – четвертое включение после 216 ч выдержки в выключенном состоянии

Для обеспечения в дальнейшем требуемой электрической прочности ЭВП с повышенным газосодержанием необходимо снижать давление остаточных газов в приборах до  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  Па (см. рис. 1) и затем проводить высоковольтную тренировку вакуумных промежутков. Такой подход обеспечивает восстановление электрической прочности приборов и уменьшает вероятность возникновения пробоев во время настройки и эксплуатации ЭВП.

Для снижения негативного влияния газов на поверхности электродов прибора и процесса отравления катода высоковольтную тренировку выполняют обычно при включенном средстве откачки [3]. Поэтому использование средства откачки, например, в виде НЭМ в ЭВП снижает давление газов в вакуумном объеме [14, 15], что способствует уменьшению пробоев тренируемого вакуумного промежутка [3]. Это явление также может оказать негативное влияние на процесс предварительной высоковольтной тренировки, так как во время пробоев происходит обычно уменьшение токов проводимости между тренируемыми электродами ЭВП, в особенности токов автоэлектронной эмиссии [6].

Известно, что при высоковольтной тренировке вакуумного промежутка в ЭВП возникают интенсивные пробои, в результате которых происходит значительное выделение абсорбированного газа или паров металла в вакуумный объем ЭВП. Иногда значительное газовыделение с поверхностей электродов прибора происходит из-за нагрева автоэмиссионных центров под действием электрического поля, которое термически нагревает их при отсутствии пробоев проходящим током [3, 5, 16]. За короткое время в процессе высоковольтной тренировки вакуумного промежутка сетка – анод отпаянного мощного прибора с выключенным НЭМ давление газа в ЭВП может достичь  $1,5 \cdot 10^{-4}$  Па (30 мкА по току НЭМ, рис. 2). «...Для ускорения процесса высоковольтной тренировки и увеличения электрической прочности необходимо научиться

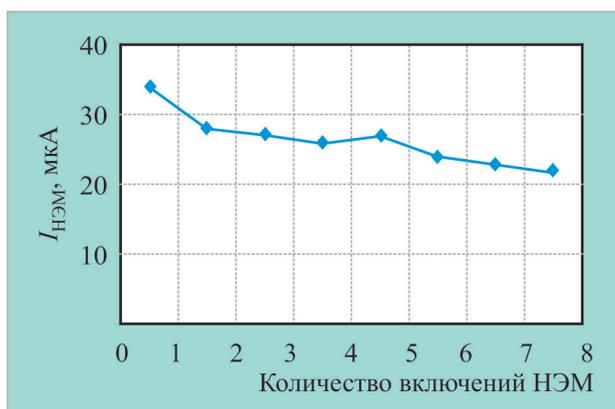


Рис. 2. Интенсивность газовой выделенности по току НЭМ электродов мощного МЛК вакуумного промежутка сетка – анод при напряженности электрического поля  $E = 11$  кВ/мм (интервал времени между включением НЭМ – 5 мин)

управлять давлением газов в процессе обработки электродов высоким напряжением отпаянных ЭВП. Для достижения этого технического результата при токе утечки, превышающем допустимое значение, в предлагаемом способе высоковольтной тренировки мощного отпаянного многолучевого клистрона с металлопористыми катодами на постоянном напряжении необходимо:

- отключить магнитный электроразрядный насос;
- подать напряжение между сеткой и анодом;
- измерить и снизить давление газа до  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па, включая и сразу выключая НЭМ;
- провести тренировку промежутка сетка – катод;
- включить НЭМ и откачать остаточные газы до  $10^{-7}$  Па.

Такой способ позволяет эффективно проводить высоковольтную тренировку, существенно снижая токи утечки и затрачиваемое время на процесс обработки электродов высоким напряжением. Использование такого способа высоковольтной тренировки при давлении остаточного газа в диапазоне от  $2,1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па на термоэмиссию катода не влияет...» [17].

В настоящее время известны способы снижения токов утечки по изоляторам ЭВП. Например, пропусканием через изолятор значительных токов [18], разогревающих пленки и вызывающих их испарение, добиваются снижения проводимости изолятора. Улучшение изоляционных свойств изолятора может быть достигнуто при возникновении электрического пробоя между островками пленки изолятора. Однако если величина тока утечки будет очень велика, то во время сильного разогрева пленки возможен процесс разрушения изолятора. Поэтому необходим точный критерий по максимально допустимой плотности мощности, рассеиваемой поверхностью изолятора пушки ЭВП.

Напыление может быть на разных поверхностях изолятора: на поверхность, обращенную в вакуумный объем ЭВП, или (и) на внешнюю поверхность. Меры устранения токов утечки зависят от места расположения пленки, которая приводит к проводимости изолятора.

«...Возникла необходимость разделения этих токов утечки и токов, формирующихся за счёт автоэлектронной эмиссии. Если ток соответствует току утечки по поверхности изолятора, то при напряжении между электродами разной полярности ВАХ должны быть предельно близки друг к другу (рис. 3, а). Если ВАХ при напряжении одной из полярностей резко отличается от другой характеристики в другой полярности напряжения между электродами, то, очевидно, что

обнаруженный ток обусловлен током автоэлектронной или пороэлектронной эмиссии с электрода, имеющего минусовой потенциал. Вероятность того, что на обоих электродах одновременно возникнут одинаковые источники автоэлектронной или пороэлектронной эмиссии электронов, близка к нулю. Поэтому снятие ВАХ между электродами при разных полярностях напряжения позволяет судить об источнике и причине появившегося паразитного тока между электродами...» [19, 20].

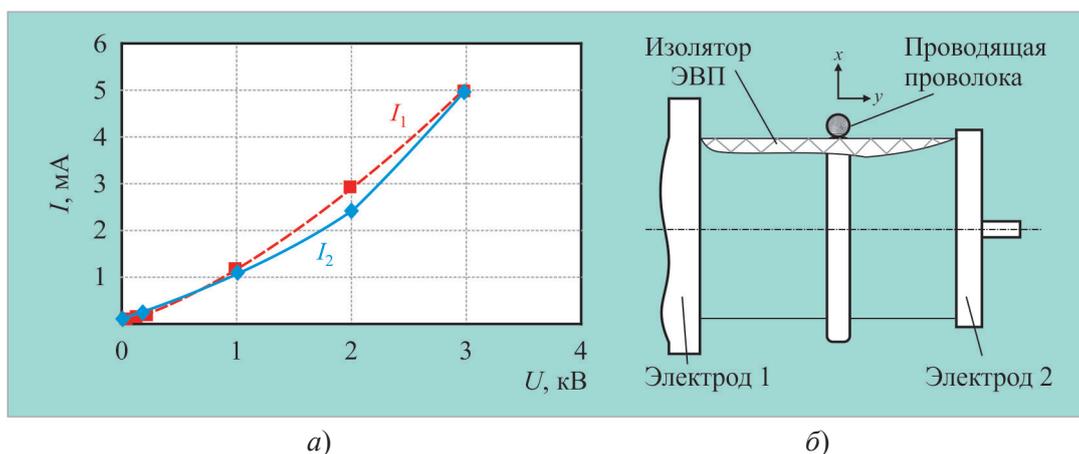


Рис. 3. К методике определения разделения токов утечки по поверхностям изолятора:

*a* – вольт-амперные характеристики промежутка сетка – анод при напылении тонкой пленки на изолятор ( $I_1$  – потенциал управляющего электрода минусовой полярности относительно корпуса ЭВП;  $I_2$  – потенциал управляющего электрода плюсовой полярности относительно корпуса ЭВП);  
*б* – схема проверки тока утечки по изолятору снаружи

Для определения проводимости снаружи керамических изоляторов разработан способ с использованием искусственно внесенного проводника в виде проволоки, устанавливаемой на изолятор между электродами исследуемого вакуумного промежутка (рис. 3, б). На неё подается высокое напряжение, при этом электроды вакуумного промежутка (электроды № 1 и 2; см. рис. 3, б) заземлены. Результаты измерений проводимости от установленного проводника до электродов сравниваются с данными измерений проводимости между электродами без установленного проводника на изолятор, что позволяет отделить проводимость изолятора снаружи от проводимости внутри вакуумной части ЭВП, определив основную проводимость.

Напыление на изолятор в вакууме, как правило, носит локальный характер, что может вызвать высокий градиент температуры по поверхности изолятора при попытке испарения проводящей пленки и разрушение изолятора ЭВП. Опасным интервалом температур для изоляторов приборов является 170...200 °С [8]. Локальный нагрев пленки может иметь существенно более высокую температуру.

Разработан метод снижения внутренних токов утечки по керамике, который заключается в подаче такого высокого напряжения на тренируемый промежуток без балластного резистора в цепи заряда тренировочного стенда, что позволяет эффективно нагревать и испарять напыленную островковую пленку на изоляторе. При достижении максимума при нагреве пленки ток утечки снижается незначительно, тогда в дальнейшем с целью повышения эффективности испарения проводящей пленки во время высоковольтной тренировки напряжение поднимали пошагово, не превышая опасную температуру разрушения изолятора прибора [19, 20]. Во время высоковольтной тренировки ЭВП без балластного резистора в цепи заряда стенда происходит

нагрев всех частей пушки (рис. 4), в особенности керамики, и иногда самого прибора в зависимости от выделяемого уровня мощности на вакуумном промежутке во время тренировки ЭВП [21].

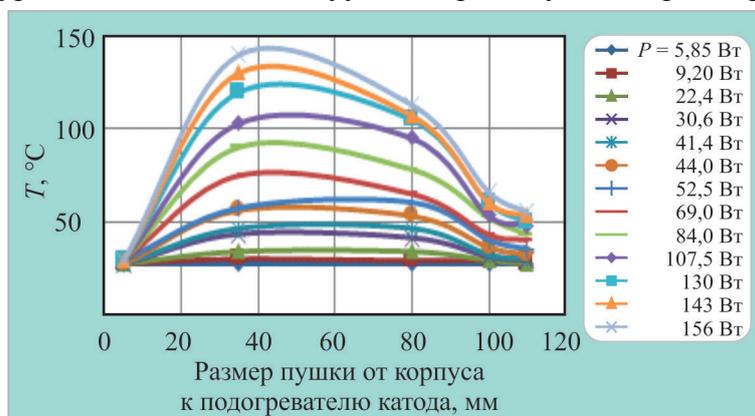


Рис. 4. Температура нагрева пушки при изменении мощности на тренируемом промежутке ЭВП

«...Практически установлено, что при увеличении мощности, подаваемой на вакуумный промежуток ЭВП, установившаяся температура узлов, в том числе изолятора электронной пушки прибора, растет линейно. Проведённые измерения, требуемое ограничение по температуре изолятора и расчёты позволили установить неравенство (1), подтвержденное на практике. Введя величину удельной мощности  $P_{уд}$ , которая также является линейной функцией от температуры (рис. 5.), это неравенство можно применить в качестве критерия для безопасной длительной тренировки вакуумных промежутков ЭВП с наружными изоляторами:

$$P_{уд} = \frac{P_{\Phi}}{S} = \frac{I_{ут} U}{S} \leq 0,83, \quad (1)$$

где  $P_{уд}$  – удельная мощность, рассеиваемая поверхностями электронной пушки во время тренировки ЭВП, Вт/см<sup>2</sup>;  $P_{\Phi}$  – средняя мощность, выделяемая на тренируемом вакуумном промежутке ЭВП во время высоковольтной тренировки, Вт;  $S$  – площадь внешней оболочки электронной пушки тренируемого ЭВП, см<sup>2</sup>;  $I_{ут}$  – ток утечки вакуумного промежутка, мА;  $U$  – напряжение высоковольтной тренировки, кВ,...» [21].

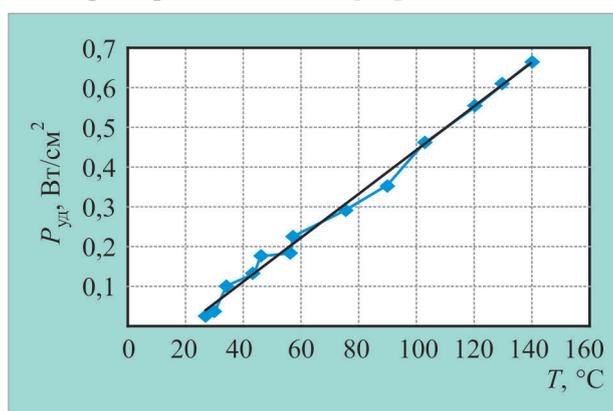


Рис. 5. Зависимость удельной мощности, рассеиваемой поверхностями пушки ЭВП во время высоковольтной тренировки вакуумного промежутка катод – анод (без балластного резистора в цепи заряда конденсаторов стенда), от температуры на изоляторе

Недостатком такой высоковольтной тренировки является то, что для значительного устранения токов утечки необходимо повышать значение напряжения выше установленной нормы, что может вызвать недопустимую энергию пробоя из-за большой емкости конденсаторов стенда тренировки. Для повышения значения напряжения необходимо снизить емкость накопительного конденсатора стенда тренировки путем добавления дополнительных конденсаторов в его схему, подключенных последовательно (рис. 6). Снижение общей емкости конденсаторов с 0,05 до 0,025 мкФ позволило увеличить напряжение высоковольтной тренировки в 1,41 раза [21].

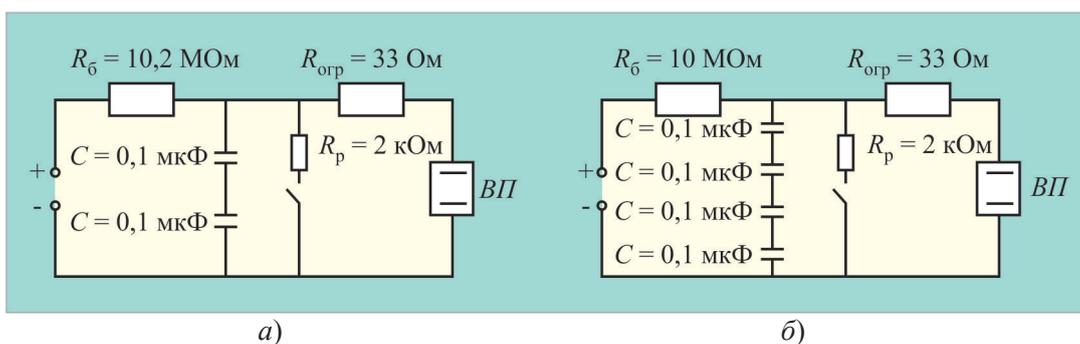


Рис. 6. Схема стенда высоковольтной тренировки ЭВП до оптимизации (а) и после (б):  $R_6$  – балластный резистор;  $R_{огр}$  – ограничительный резистор;  $R_p$  – разрядный резистор;  $C$  – емкости шунтирующих конденсаторов; ВП – вакуумный промежуток ЭВП

В данной схеме стенда можно использовать высоковольтную тренировку с балластным резистором в цепи заряда и без него. Для повышения электрической прочности ЭВП и уменьшения токов между электродами вакуумных промежутков эффективным способом оказалась тренировка без балластного резистора  $R_6$  стенда в цепи заряда с использованием емкости шунтирующего конденсатора 0,05 мкФ. Существенного влияния на термоэмиссию катода во время такой обработки не выявлено [20]. Следует отметить, что в результате такой тренировки ЭВП при больших напряженностях поля между электродами может появиться опасность разрушения электродов, в том числе катода, что может повлиять на его эмиссионную способность [22]. Такая опасность появляется во время перехода пробоя в вакуумную дугу, тогда в качестве гасителя и выступает балластный резистор, благодаря большой постоянной времени цепи заряда конденсаторов [9]. Исследуя процесс высоковольтной тренировки с разными балластными резисторами (рис. 7), пришли к выводу, эффективность высоковольтной тренировки наблюдается при значениях  $R_6 \leq 10 \text{ МОм}$ .

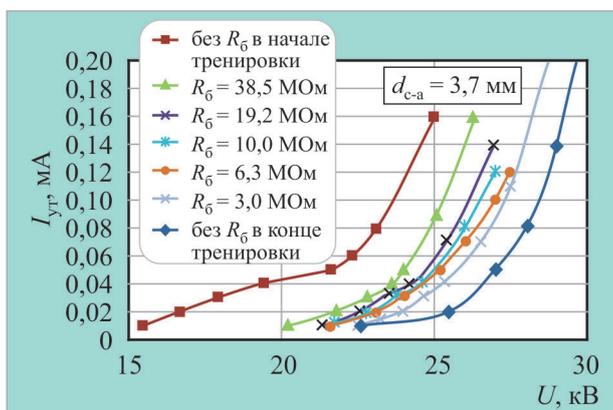


Рис. 7. ВАХ вакуумных промежутков сетка – анод ЭВП в процессе тренировки с разными балластными резисторами  $R_6$

Обычно высоковольтная тренировка приборов без  $R_6$  стенда проводится кратковременной и только для уменьшения или полного избавления от токов утечки вакуумных промежутков, после чего необходимо производить тренировку с  $R_6$ . Очевидно, что длительное воздействие на электроды высоких напряженностей полей в процессе проведения тренировки может оказать негативное влияние на состояние электродов ЭВП. Для выбора оптимального режима технологического процесса тренировки необходимо учитывать не только напряженность поля между электродами ЭВП, но и значение давления газов в ЭВП, величину тока утечки, тип катода, особенности вольт-амперной характеристики тренируемого промежутка и другие параметры и свойства ЭВП, влияющие на технологию высоковольтной тренировки.

Во время предварительной высоковольтной тренировки имеет значение полярность напряжения (рабочая или обратная) тренируемого промежутка прибора. Также эффективно можно производить высоковольтную тренировку ЭВП двух межэлектродных промежутков одновременно, притом недостатки разрушения электродов можно избежать при отключённом накалие [23, 24]. Приведенными способами в процессе высоковольтной тренировки не всегда удастся устранить токи утечки, в особенности на вакуумном промежутке сетка – катод.

С целью повышения электрической прочности ЭВП разработан способ одновременной тренировки мощных многолучевых клистронов, который заключается в подаче высокого напряжения на сетку относительно катода без  $R_6$  (согласно схеме рис. 6, а), а на анод (корпус прибора) относительно сетки с  $R_6$  (согласно схеме рис. 6, б). Величину напряжения на аноде поднимают до пробивного таким образом, чтобы она превышала энергию пробоя, разрушающую неоднородности поверхностей электродов. Эффективность такой тренировки достигается за счет эффективного воздействия напряжения без  $R_6$  на вакуумный промежуток сетка – катод ЭВП и возникновения пробоев, которые формируются за счет повышения напряжения до определенной безопасной величины. При этом пробой в процессе тренировки происходит на двух промежутках одновременно.

Величина безопасного высокого напряжения в плюсовой полярности, подаваемого на корпус клистрона, увеличивается до значений энергии пробоя, не превышающей 30...50 Дж [25, 26], исходя из формулы допустимой энергии пробоя:

$$E = \frac{CU^2}{2} < 30...50 \text{ Дж}, \quad (2)$$

где  $C$  – общая емкость конденсаторов стенда, Ф;  $U$  – подаваемое напряжение, В.

Исходя из формулы (2), общее максимальное напряжение одновременной тренировки относительно сетки при энергии 30 Дж составляет:

$$U_1 = \sqrt{\frac{2E}{C_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 30 \text{ Дж}}{0,025 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}}} = 49 \text{ кВ}, \quad (3)$$

где  $U_1$  – общее напряжение высоковольтной тренировки на вакуумном промежутке сетка – корпус с применением емкости конденсаторов стенда  $C_1 = 0,025$  мкФ. При этом энергия от разряда конденсатора на тренируемый промежуток будет в два раза меньше, чем при емкости конденсатора 0,05 мкФ, что и дает физическую возможность повышения напряжения тренировки.

Данный способ повышает электрическую прочность двух вакуумных промежутков, причём значительно на промежутке сетка – катод прибора за счет уменьшения токов утечки между тренируемыми электродами без разрушения их поверхностей. Из примера вольт-амперной

характеристики  $I$  (рис. 8), снятой в процессе высоковольтной обработки ЭВП, видно, что после обычной одновременной высоковольтной тренировки (с балластным сопротивлением 10 МОм в цепи заряда стэнда и ёмкостью конденсаторов 0,05 мкФ в обеих полярностях) ток утечки при 10 кВ составляет 0,82 мА, что уже превышает допустимую норму для этого прибора. Допустимый ток утечки для этого клистрона составляет 0,2 мА при 10 кВ. После предлагаемой высоковольтной тренировки клистрона, как видно из вольт-амперной характеристики 2 (см. рис. 8), ток утечки при 10 кВ составляет 0,03 мА, что существенно меньше допустимой утечки для этого прибора.

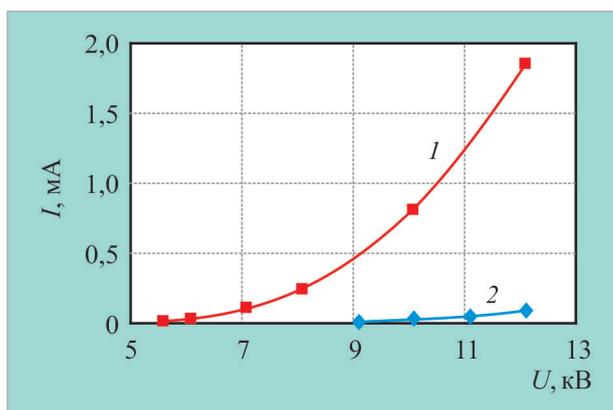


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики вакуумного промежутка сетка – катод ( $d_{\text{с-к}} = 0,55$  мм) на различных стадиях высоковольтной тренировки:  
 $1$  – обычная одновременная тренировка;  $2$  – оптимизированный способ одновременной тренировки

После предложенного способа одновременной высоковольтной тренировки ток термоэлектронной эмиссии (рис. 9, кривая 2) катода значительно не изменился по сравнению с током термоэлектронной эмиссии (рис. 9, кривая 1), измеренным после откачки прибора.

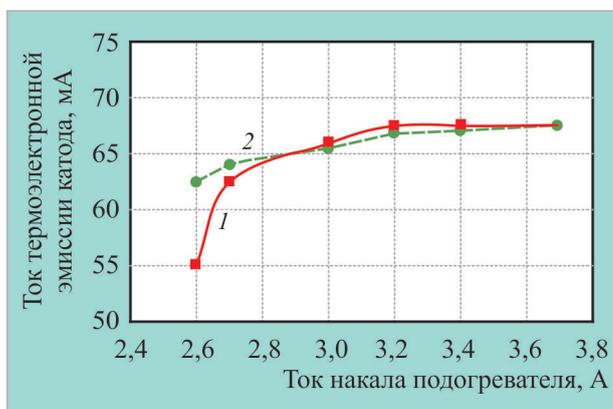


Рис. 9. Графики изменения термоэлектронной эмиссии катодов клистрона от тока накала катода:

$1$  – до тренировки (на откачном посту);  $2$  – после одновременной тренировки (отпаянный прибор)

Разработанные методики высоковольтной предварительной тренировки позволяют повысить количество годных ЭВП после откачки, значительно снижая технологические потери приборов по параметру тока утечки.

### 3. ВЫВОДЫ

1. Исследовано повышенное газосодержание ЭВП, влияющее на токи проводимости вакуумных промежутков. Предложен способ устранения данного явления путем значительной выдержки ЭВП с включенным номинальным режимом накала катода при откачке ЭВП встроенным НЭМ до достижения давления остаточных газов  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  Па.

2. Разработана методика высоковольтной тренировки с установленным критерием при безопасном повышенном давлении остаточных газов в отпаянных ЭВП в диапазоне от  $2,1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па.

3. Разработана и внедрена методика снижения токов утечки изоляторов отпаянных ЭВП, позволяющая разделять наружную и внутреннюю проводимости изолятора.

4. Установлено условие безопасной высоковольтной тренировки с целью снижения внутренних токов утечки наружных цилиндрических изоляторов ЭВП, при котором необходимо подбирать режимы высоковольтной тренировки так, чтобы удельная мощность пушки во время тренировки удовлетворяла условию  $P_{уд} \leq 0,83$  Вт/см<sup>2</sup>.

5. Разработана методика одновременной высоковольтной тренировки для отпаянных мощных многоручевых клистронов, позволяющая эффективно избавляться от токов утечки вакуумного промежутка сетка – катод, не превышая опасную энергию пробоя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Благодарный, В. В.** Токи утечки в ЭВП / В. В. Благодарный // *Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ.* – 1989. – Вып. 2 (1422).
2. **Грановский, В. Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский // *Главная редакция физико-математической литературы.* – М.: Наука, 1971.
3. **Черепнин, Н. В.** Сорбционные явления в вакуумной технике. – М.: Сов. радио, 1973.
4. **Латам, Р.** Вакуумная изоляция установок высокого напряжения / Р. Латам, перевод с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. **Сливков, И. Н.** Электрический пробой и разряд в вакууме / И. Н. Сливков, В. И. Михайлов, Н. И. Сидоров, А. И. Настюха. – М.: Атомиздат, 1966.
6. **Сливков, И. Н.** Электроизоляция и разряд в вакууме / И. Н. Сливков. – М.: Атомиздат, 1972.
7. **Сливков, И. Н.** Процессы при высоком напряжении в вакууме / И. Н. Сливков. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. **Коваленко, В. Ф.** Теплофизические процессы и электровакуумные приборы / В. Ф. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1975.
9. **Татарина, Н. В.** Вакуумная электроизоляция (обзор) / Н. В. Татарина // *Вакуумная техника и технология.* – 2003. – Т. 13, № 1. – С. 3 – 29.
10. **Вашин, С. А.** О динамике сорбционного равновесия газов отпаянного высоковольтного ЭВП / С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин // *Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника.* – 2014. – Вып. 3 (522). – С. 48 – 54.
11. **Вашин, С. А.** Интенсивность пробоев и газосодержание высоковольтных ЭВП / С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин // *25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015).* Севастополь, 6 – 12 сентября 2015 г.: материалы конф. В 2 т. – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 203 – 204.
12. **Вашин, С. А.** Компрессия по водороду в отпаянных ЭВП / Г. Ф. Корепин // *Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника.* – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 22 – 28.
13. **Корепин, Г. Ф.** Стоки и истоки поверхностных газов отпаянных ЭВП / Г. Ф. Корепин, А. Н. Юнаков // *Вакуумная техника и технология.* – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 71 – 76.

14. **Корепин, Г. Ф.** Возможности масс-спектрометрии поверхностных газов высоковольтных ЭВП без масс-спектрометра / Г. Ф. Корепин // Вакуумная техника и технология. – 2008. – Т. 18, № 2. – С. 141 – 148.
15. **Вашин, С. А.** Полевая десорбция поверхностных газов и электрическая прочность ЭВП / Г. Ф. Корепин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 3 (534). – С. 44 – 47.
16. **Месяц, Г. А.** Импульсный электрический разряд в вакууме. – М.: Атомиздат, 1984. – 256 с.
17. **Пат. 2656147 РФ, МПК G 01 R 31/25.** Способ высоковольтной тренировки отпаянного электровакуумного прибора с металлопористыми катодами / С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин, Т. В. Морокова. – Приоритет от 6.03.2017.
18. **Пат. 4610775 США.**
19. **Вашин, С. А.** Метод снижения токов утечки изоляторов отпаянных ЭВП / С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин, Н. Н. Климова // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 1 (528). – С. 23 – 30.
20. **Вашин, С. А.** Снижение токов утечек отпаянных ЭВП / С. А. Вашин // Тезисы докладов VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2016. – С. 23 – 24.
21. **Вашин, С. А.** Снижение токов изоляторов отпаянных ЭВП / Г. Ф. Корепин, Д. Н. Петрашева, В. Г. Карпенко, Н. Р. Чуйкин // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технология – 2018». – С. 16 – 19.
22. **Смирнов, А. В.** Тренировка СВЧ-приборов высоковольтными пробоями / А. В. Смирнов, И. А. Светликина, Е. Н. Еловская // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1983. – Вып. 11(965).
23. **Корепин, Г. Ф.** Термовакuumная обработка электронной пушки и вероятность электрических пробоев высоковольтных ЭВП // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т. 17, № 2. – С. 123 – 130.
24. **Иориш, А. Е.** Основы производства электровакуумных приборов / А. Е. Иориш, Я. А. Кацман, С. В. Птицын. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
25. **Ингерман, М. И.** Оптимальные режимы применения и эксплуатации ЭВП / М. И. Ингерман, М. С. Эпштейн. – М.: Радио и связь, 1985.
26. **Staprans, A.** Highpower-linear-beam tubes / A. Staprans, E. W. McCune, G. A. Ruetz // Proc. IEEE. – 1973. – Vol. 61, No 3. – P. 299 – 300.

Статья поступила 6 марта 2019 г.

УДК 621.9.047

## УДАЛЕНИЕ ЗАУСЕНЦЕВ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ МЕДИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**В. С. Слабченко, М. С. Косенко, Д. Д. Сериков**

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

Разработана технология по удалению заусенцев на мелкогабаритных деталях из меди методом электролитно-химической обработки. Проведен расчет режимов и времени обработки на экспериментальной установке с выбором электролита и электрода.

*КС: удаление заусенцев, медные детали, электролитно-химическая обработка, установка, режимы обработки, электролит*

## DEBURRING FROM COPPER PARTS BY ELECTROLYTIC-CHEMICAL TREATMENT

**V. S. Slabchenko, M. S. Kosenko, D. D. Serikov**

*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

Technology of deburring from small-size copper parts by electrolytic-chemical treatment has been developed. The calculation of the modes with the time of treatment on experimental equipment with the choice of electrolyte and electrode was performed.

*Keywords: deburring, copper parts, electrolytic-chemical treatment, equipment, modes of treatment, electrolyte*

### 1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

После механической обработки на обрабатывающем центре на поверхностях деталей образуется мелкий заусенец (0,1...0,3 мм), который недопустим при пайке сборочного узла. Действующий метод удаления заусенца является трудоемким и подвергается большому влиянию человеческого фактора. Он основан на ручном удалении заусенца шабером, что приводит к большому увеличению штучного времени и браку.

Электролитно-химическая обработка заменяет трудоемкие механические методы и не приводит к нежелательным структурным изменениям в поверхностном слое изделий [1, 2]. Данная обработка характеризуется высокой производительностью, стабильностью процесса, возможностью обработки деталей со сложной пространственной геометрией, различных токопроводящих материалов, управляемостью процесса, высокой повторяемостью процесса, удалением заусенцев с выполнением технических требований, указанных на чертеже.

Рассмотрим принцип удаления заусенцев электролитно-химической обработкой.

Схема электролитно-химической обработки приведена на рис. 1.

В электролитно-химической технологии обрабатываемое изделие является анодом, к нему подводится положительный потенциал от источника питания, а катодом является рабочая ванна. В зависимости от приложенного напряжения при прохождении электрического тока через раствор электролита наблюдаются различные режимы электрических процессов вблизи анода (рис. 2).

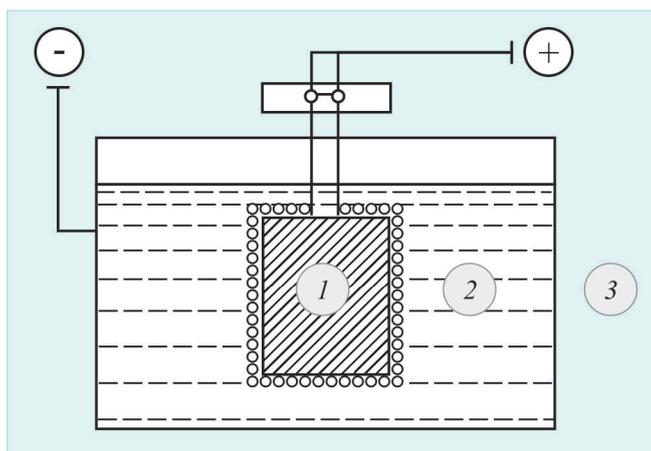


Рис. 1. Схема работы установки:  
1 – обрабатываемое изделие; 2 – электролит; 3 – рабочая ванна

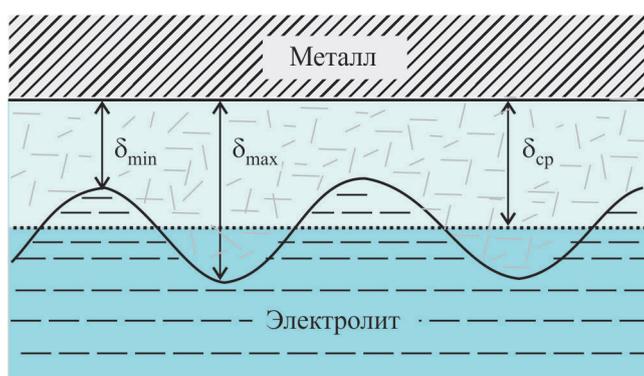


Рис. 2. Электрические процессы вблизи анода

Режим с обычным электролизом, при котором происходит перенос ионов металла и наблюдается газовыделение в зависимости от состава электролита и материала электродов, описывается классической электрохимией [2].

С повышением напряжения на электродах устанавливается переходный, или коммутационный, режим, когда вокруг активного электрода (анода) периодически, с частотой порядка 100 Гц, образуется пароплазменная оболочка, приводящая к запиранию тока в течение  $10^{-4}$  с.

При повышении напряжения вокруг анода образуется устойчивая пароплазменная оболочка, характеризующаяся малыми колебаниями тока при  $U = \text{const}$ , происходит процесс электролитно-химической обработки. По всей обрабатываемой поверхности зарождаются импульсные электрические разряды. Совместное воздействие на поверхность детали химически активной среды и электрических разрядов приводит к возникновению эффекта удаления заусенцев и очистки поверхности изделий.

Факторы, влияющие на процесс обработки [2, 3]: электролит, температура электролита, рабочее напряжение, импульсный ток, время обработки.

## 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Основной задачей эксперимента является разработка технологического процесса по удалению заусенцев на мелкогабаритных деталях из меди с соблюдением всех технических требований, указанных на чертеже, в соответствии с заданной шероховатостью. Сведений о электролитно-химической обработке недостаточно, чтобы разработать приведенную технологию с соблюдением требований, предъявляемых к деталям электроники, электротехники и СВЧ-техники. Поэтому проведем серию экспериментов, основываясь на другие электрохимические методы обработки.

В экспериментальную установку электролитно-химической обработки [2] для удаления заусенцев входят: ванна для химического обезжиривания, ванна для импульсного электрохимического удаления заусенцев с приспособлением для погружения обрабатываемых деталей, ванна для промывки холодной водой, нагревательный элемент для обеспечения заданной температуры электролита, генератор напряжения, вольтметр и амперметр (позволяют контролировать электрические составляющие процесса), устройство контроля времени пребывания изделия в ванне в процессе работы установки, клавиша вкл./выкл. электропитания, механизм перемещения образца.

Этапы проведения эксперимента: 1) включение установки с выбором заданных режимов обработки; 2) нагрев электролита; 3) обезжиривание детали; 4) деталь в приспособлении погружается в ванну импульсного электрохимического удаления заусенцев на заданное время обработки; 5) деталь промывается в ванне с холодной водой; 6) контроль.

Проведем серию экспериментов на материале М0б, ГОСТ 15471-77. Детали характеризуются мелкими габаритами, большим наличием заусенцев и следами механической обработки.

Эксперимент 1 – удаление заусенцев путем циклической обработки детали «Рамка». Наличие заусенцев на острых кромках детали, крупные заусенцы в пазах, следы механической обработки. Раствор электролита – ортофосфорная кислота. Тип электрода – круглый. Задаем режимы обработки: импульсный ток и напряжение; температура электролита может колебаться от 28 (min) до 38 °С (max). Деталь опускается в электролит на время обработки: 30 с – значительное уменьшение следов механической обработки, отсутствуют заусенцы по кромке детали, крупный заусенец в пазах остался; 60 с – отсутствуют следы механической обработки и заусенцы по кромке детали, крупный заусенец в пазах уменьшился в 2 раза; 1,5 мин – полностью отсутствуют следы механической обработки, отсутствуют заусенцы по кромке детали, отсутствует крупный заусенец (рис. 3).

Эксперимент 2 – непрерывное удаление заусенцев на детали «Рамка» на ранее выбранных режимах обработки. Деталь опускается в электролит на 3 мин – полностью отсутствуют следы механической обработки, отсутствуют заусенцы по кромке детали, отсутствует крупный заусенец (рис. 4).

Эксперимент 3 – удаление заусенцев путем циклической обработки детали «Основание». Наличие заусенцев на острых кромках детали, крупные заусенцы на гранях и пьедесталах, следы механической обработки. Электролит используется того же состава. Обработку проводим на ранее выбранных режимах. Деталь опускается в электролит на 30 с – значительное уменьшение следов механической обработки, отсутствие заусенцев по кромке детали, уменьшение заусенцев на пьедесталах и крупных заусенцев на гранях; 60 с – уменьшение следов механической обработки, уменьшение заусенцев. Импульсный ток увеличиваем в 2 раза. Время обработки равно

2 мин – полностью отсутствуют следы механической обработки, отсутствуют заусенцы по кромке детали и на пьедесталах, отсутствует крупный заусенец на гранях (рис. 5).

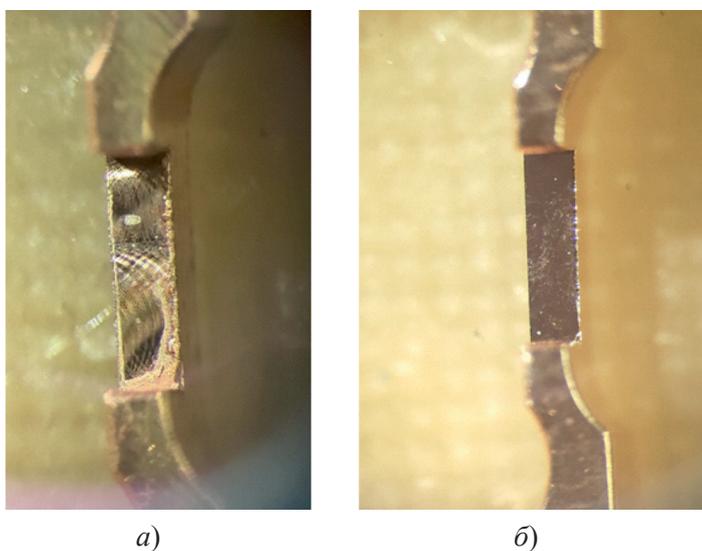


Рис. 3. Деталь «Рамка»:  
а – до обработки (видны заусенцы); б – после обработки (заусенцы удалены)

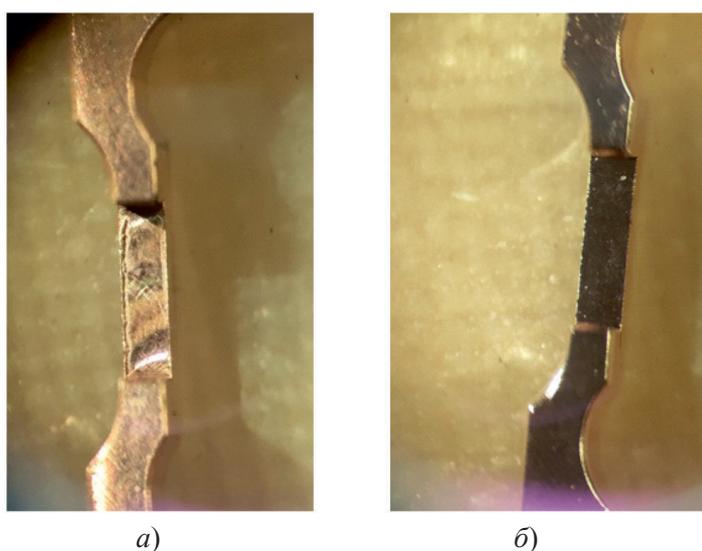
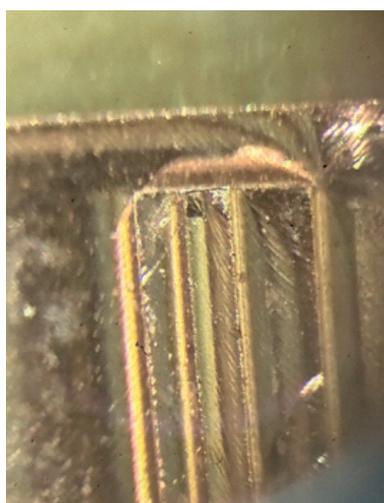


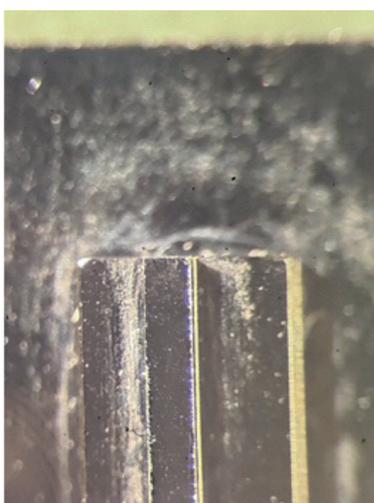
Рис. 4. Деталь «Рамка»:  
а – до обработки (видны заусенцы); б – после обработки (заусенцы удалены)

Эксперимент 4 – непрерывное удаление заусенцев на детали «Основание» на ранее выбранных режимах обработки. Деталь опускается в электролит на 3,5 мин – полностью отсутствуют следы механической обработки, отсутствуют заусенцы по кромке детали, отсутствует крупный заусенец (рис. 6).

Контроль ранее обработанных деталей подтвердил отсутствие заусенцев на обработанных поверхностях с соблюдением всех технических требований, указанных на чертеже.



а)



б)

Рис. 5. Деталь «Основание»:  
а – до обработки (видны заусенцы); б – после обработки  
(заусенцы удалены)

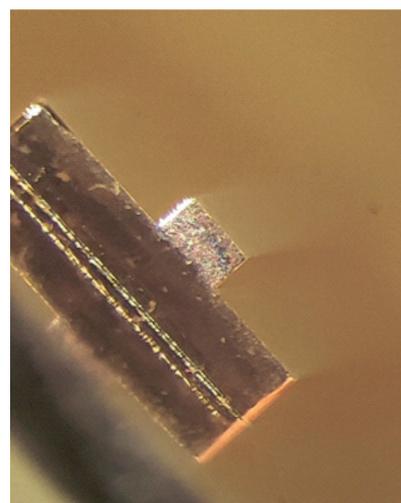


Рис. 6. Деталь «Основание»  
после обработки  
(заусенцы удалены)

### 3. ВЫВОДЫ

Из результатов экспериментов и анализа литературы можно сделать вывод, что данный метод полностью подходит для решения поставленной задачи по снятию заусенцев с деталей из меди с соблюдением всех технических требований. Для достижения положительного результата были учтены факторы, влияющие на процесс обработки: химический состав электролита и его концентрация; импульсный ток; температура электролита; рабочее напряжение; время обработки и подготовка детали. В то же время происходит частичное удаление материала, что решается путем изготовления деталей с предварительно заданным припуском на механической обработке  $-0,01 \dots 0,03$  мм.

Также возможно снятие заусенцев совместно с полировкой изделия. В процессе электролитно-химической полировки по всей обрабатываемой поверхности проходят импульсные электрические разряды, которые наиболее активны на выступах. Совместное воздействие на неровности детали химически активной среды и электрических разрядов может приводить к возникновению одновременного эффекта полирования, снятия заусенцев и притупления кромок. Однако технология позволяет разработку специальных электролитов, которые не приводят к полировке, но хорошо избавляют от заусенцев и жировых отложений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин и др.; под общей ред. А. М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2002. – С. 447 – 450.
2. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск: Беларус. навука, 2010. – С. 15 – 18, 22 – 24, 79 – 110.
3. Байсупов, И. А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Высш. школа, 1981. – С. 11, 19 – 25.

Статья поступила 12 марта 2019 г.

УДК 621.9.018.5

## ПОЛУЧЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ ПРОФИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ПРОШИВОЧНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Д. Д. Сериков, В. С. Слабченко, И. В. Герольд

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

Разработана технология изготовления отверстий со сложным контуром в деталях из латуни методом электроискровой прошивки с использованием профильного электрода. Проведен расчет режимов обработки на экспериментальном оборудовании с выбором электрода.

*КС: прошивка отверстий, профильный электрод, конусное отверстие, электроискровой станок*

## RECEIVING HOLES WITH A PROFILE ELECTRODE ON AN ELECTROSPARK PIERCING EQUIPMENT

D. D. Serikov, V. S. Slabchenko, I. V. Gerold

*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

A technology for making holes with a complex contour in brass parts by method of electrospark piercing using a profile electrode has been developed. The calculation of processing modes on experimental equipment with the choice of the electrode was performed.

*Keywords: hole piercing, profile electrode, tapered hole, electrospark discharge machine*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ввиду необходимости развития на производстве современных способов изготовления отверстий со сложным контуром, существует потребность в проработке оптимальной технологии, способной обеспечить все требуемые конструкционные особенности изделий. Наряду со сверлением и продавливанием отверстий широкое применение получил электроискровой способ образования отверстий в металле [1].

Целью данной работы является разработка новой технологии получения отверстий со сложным контуром профильным электродом на электроискровом прошивочном оборудовании.

### 2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ

Метод электроискровой обработки основывается на разрушении металла под действием импульсного разряда между поверхностями обрабатываемой заготовки и электродом (рис. 1, 2). Поскольку преимущественно разрушается анод, то по форме и размерам разрушаемый участок соответствует катоду [2].

Напряжение и силу электрического тока, а также ёмкость конденсатора можно изменять в больших пределах, в зависимости от вида обработки, инструмента и материала обрабатываемой

заготовки. Конденсатор служит для накопления энергии и мгновенного выделения её в виде искрового разряда. От параметров электрического тока зависит производительность, а также точность и шероховатость получаемых отверстий. Электроискровым способом можно получить отверстие с криволинейной осью, что механическим путём достичь невозможно. Отверстия обычно обрабатывают с применением масляных или керосиновых диэлектриков [3].



Рис. 1. Демонстрация процесса эрозионной прошивки отверстия профильным электродом

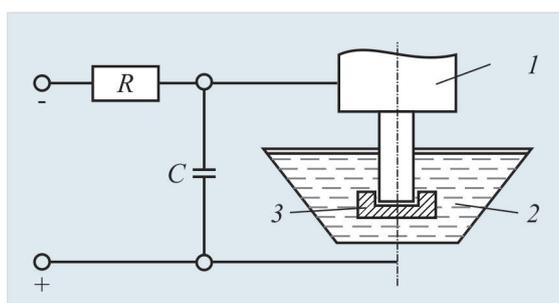


Рис. 2. Схема электроискровой обработки металлов [4]:

1 – электрод-инструмент; 2 – жидкий диэлектрик; 3 – электрод-заготовка

Электрод-инструмент изготавливают в зависимости от конструкции из латуни, меди, алюминия и других токопроводящих материалов. Инструмент должен иметь профиль, аналогичный профилю прошиваемого отверстия. Размеры инструмента должны быть несколько меньше размеров отверстия. Зазор между поверхностями инструмента и отверстия зависит от электрического режима обработки и свойств прошиваемого металла и материала электрода. От инструмента требуются высокая износостойкость, достаточная механическая прочность, хорошая электропроводность. Инструмент может быть мягче изделия, так как через него не передаются механические усилия. Во время обработки в зависимости от режима и материала среды износ инструмента составляет от 20 до 150 % от массы удаляемого металла. В результате износа изменяется форма инструмента, а значит, искажается форма получаемого изделия [5].

### 3. ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изделием, требующим изменение технологии изготовления, является корпус из материала ЛС 59-1, ГОСТ 2060-90 (рис. 3).

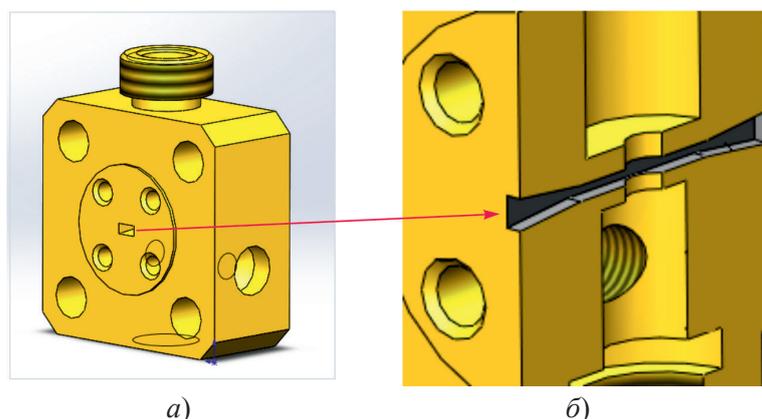


Рис. 3. Модель изделия «Корпус» (а); конусный паз (б)

Основной сложностью существующей технологии является изготовление и спайка двух половин детали с предварительно полученным фигурным пазом при помощи дисковой и концевой фрезы (рис. 4).

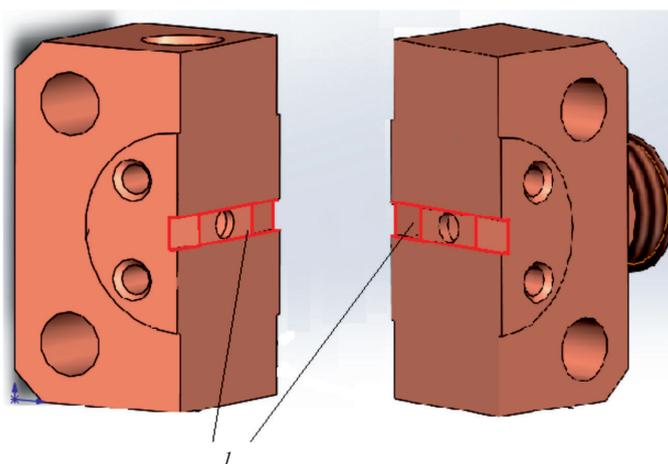


Рис. 4. Сборка изделия «Корпус» из двух половин (I – поверхности, получаемые фрезерной обработкой)

Данный метод получения отверстия в корпусе является более сложным и длительным, чем обработка с помощью электрода на электроискровом оборудовании.

Электроискровой метод получения исключает из технологического процесса часть долгосрочных металлообрабатывающих операций, позволяет получать изделие «Корпус» целиком, не прибегая к спайке двух отдельных половин, тем самым уменьшая трудоемкость и увеличивая точность получаемого отверстия.

#### 4. РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРСТИЯ

Задачей проводимого эксперимента является разработка новой технологии получения отверстий со сложным контуром, методом прошивки отверстия профильным электродом на электроискровом прошивочном оборудовании, с соблюдением всех технических требований, указанных на чертеже, в соответствии с заданной шероховатостью и точностью.

При разработке технологии были проанализированы и учтены следующие факторы, необходимые для достижения итогового результата:

1. Подбор оборудования, способного производить необходимые операции обработки.
2. Сложность конструкции детали при выборе баз, необходимых для получения точного контура и заданной шероховатости.
3. Выбор материала инструмента и режимов обработки, влияющих на электрическую эрозию электродов. Неправильный подбор приводит к некачественной поверхности контура профиля и шероховатости изделия.
4. Выбор инструмента-электрода. Требуется индивидуально изготовленный инструмент с определенной геометрией, необходимой для получения отверстий.
5. Подбор режимов обработки при изготовлении отверстия – сила тока, напряжение, импульс, емкость конденсатора.

В качестве заготовки для электроискровой обработки изделия «Корпус» используется деталь с предварительно проведенной механической обработкой (рис. 5).

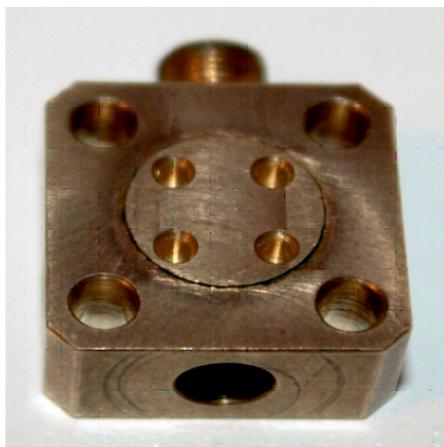


Рис. 5. Деталь-заготовка «Корпус» после предварительной механической обработки (материал ЛС 59-1, ГОСТ 2060-90)

Для обеспечения прошивки отверстия изготавливается инструмент-электрод. Данный электрод был изготовлен на проволочно-вырезном станке по необходимым размерам (рис. 6).

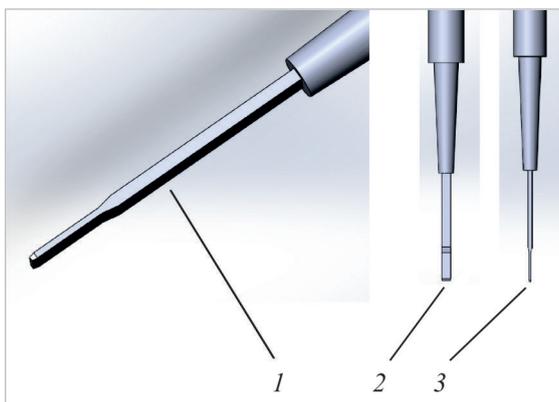


Рис. 6. Эскизы профильного инструмента-электрода:  
1 – вид в изометрии; 2 – вид спереди; 3 – вид сбоку

Необходимое отверстие представляет собой два конусных углубления, соединяемых сквозным прямоугольным каналом. Данное отверстие имеет сложную геометрию, поэтому для него потребовалось изготовление специального электрода.

Электроэрозионный прошивочный станок состоит из литой станины, предназначенной для крепления всех узлов станка, рабочего стола, рабочей ванны, оснащенной датчиками уровня диэлектрика и температуры, необходимой для проведения операций прошивки, автоматического сменщика электродов, генератора, предназначенного для регулировки импульса, пневматического патрона для крепления электрода-инструмента и системы управления станком.

Этапы проведения эксперимента: 1) включение станка с выбором заданных режимов обработки; 2) установка электрода в патроне; 3) выбор баз и закрепление заготовки в специализированной оснастке; 4) заполнение рабочей ванны; 5) процесс прошивки отверстия; 6) переустановка детали и проведение операции с обратной стороны изделия.

В процессе обработки закрепленная заготовка помещалась в ванну с жидким диэлектриком, задавались выбранные режимы обработки. Основной установочной базой были выбраны четыре отверстия.

Согласно предварительно заложенной в модуль ЧПУ программе, электрод-инструмент постепенно перемещался к заготовке. По мере сближения электрода и заготовки возрастала напряженность поля в межэлектродном промежутке. При достижении определенной напряженности поля на участке с минимальным расстоянием между поверхностями электродов наблюдалось возникновение электрического разряда, под действием которого происходило разрушение участка заготовки (рис. 7).

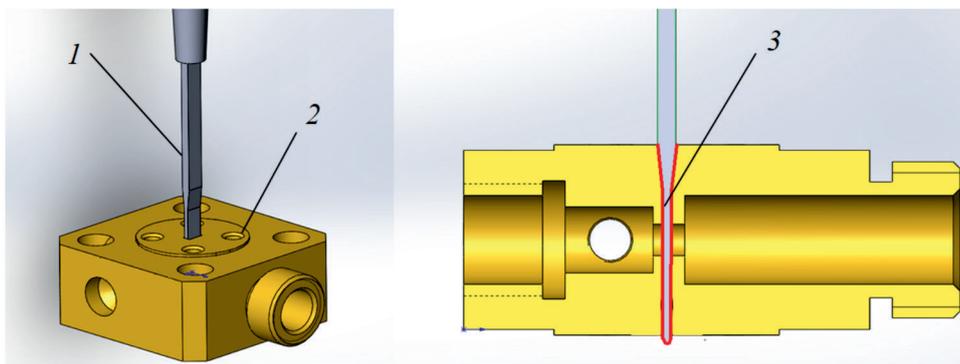


Рис. 7. Процесс прошивки детали электродом:

1 – электрод-инструмент; 2 – деталь-заготовка; 3 – контур электрода в разрезе

Электрод-инструмент прошил заготовку, образовав контур отверстия, подобный контуру электрода.

После проведения операций была выполнена переустановка заготовки и проведена прошивка отверстия с обратной стороны аналогичным методом (рис. 8.)

После проведения всех операций получена деталь с заданным контуром (рис. 9).

В ходе проведения эксперимента была изготовлена партия латунных деталей с последующим контролем при помощи координатно-измерительной машины на соответствие требованиям чертежа. Для более корректного измерения одна деталь была разрезана (рис. 10).

Результаты измерений показали, что размеры канала полностью соответствуют требованиям чертежа.

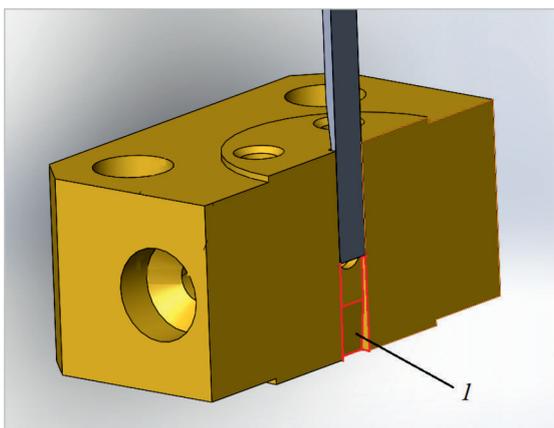


Рис. 8. Прошивка электродом с обратной стороны  
(1 – контур, образовавшийся после прошивки на 1-м этапе)

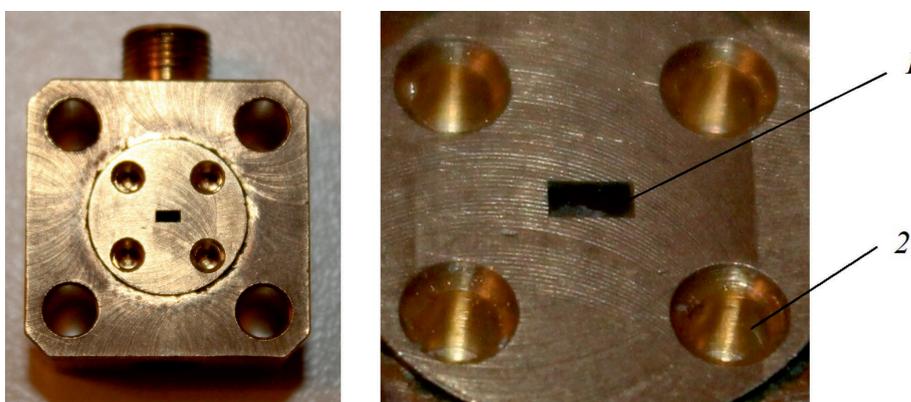


Рис. 9. Деталь с полученными конусными отверстиями методом электродной прошивки:  
1 – конусное отверстие; 2 – установочные базы

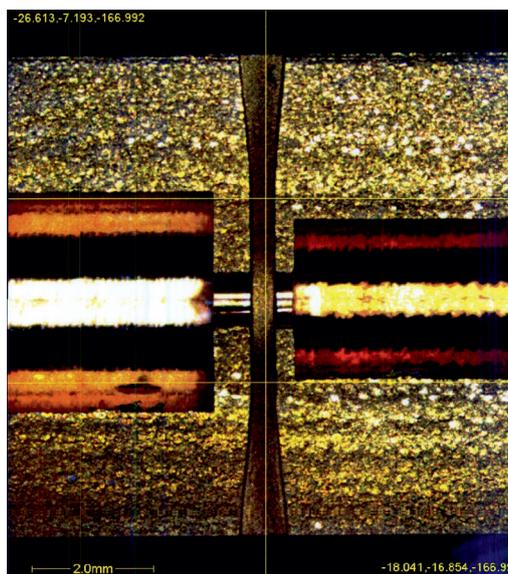


Рис. 10. Разрезанная деталь в увеличении

## 5. ВЫВОД

Из результатов проведенного эксперимента можно сделать следующий вывод, что данный метод полностью подходит для решения поставленной задачи – получение отверстий со сложным контуром профильным электродом на электроискровом прошивочном оборудовании с соблюдением всех технических требований. Для достижения положительного результата были учтены факторы, влияющие на процесс обработки. В результате эксперимента был разработан новый технологический процесс, получена возможность изготавливать деталь монолитной формы, не прибегая к спайке двух половин. Это позволило уменьшить трудоемкость, сократить время изготовления детали и увеличить точность поверхности канала отверстия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Куркин, В. И. Устройство и наладка оборудования электровакуумного производства / В. И. Куркин, В. С. Житников. – 1977. – 115 с.
2. Данилевский, В. В. Технология машиностроения / В. В. Данилевский. – 1977. – 355 с.
3. Чернов, Н. Н. Учебник для машиностроительных техникумов / Н. Н. Чернов. – М.: Машиностроение, 1978. – 344 с.
4. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, И. А. Арутюнова, Т. М. Барсукова и др.; под общ. ред. А. М. Дальского. – М.: Машиностроение, 1985. – 404 с.
5. Чудаков, Е. А. Справочник машиностроителя. Т. 2 / Е. А. Чудаков. – 1952. – 951 с.

Статья поступила 12 марта 2019 г.

## === НОВЫЕ КНИГИ ===

ОСТАПЕНКОВ П. С., СМОЛЬСКИЙ С. М. **Особенности обработки сигналов в современных измерительных системах:** учеб. пособие / П. С. Остапенков, С. М. Смольский. – М.: КУРС, 2018. – 208 с.

В учебном пособии изложены вопросы построения радиоприемных устройств на примере современного анализатора спектра, выпускаемого компанией «Rohde&Shwarz». Анализатор спектра – это измерительный прибор, являющийся, по существу, современным радиоприемным устройством, на основе которого можно успешно освоить и закрепить знания по курсам радиоприемных устройств.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов радиотехнических специальностей, а также представляет практический интерес для инженеров – проектировщиков устройств обработки сигналов.

# ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

## ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗОНАТОРНОЙ СИСТЕМЫ МАГНЕТРОНА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЕГО РАБОТУ В РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ

М. А. Фурсаев

*СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов*

Проведен анализ частотной зависимости сопротивления резонаторной системы магнетрона, работающего в режиме синхронизации, при наличии неоднородности между его выходом и циркулятором. Рассмотрено влияние этой зависимости на условия работы магнетрона в таком режиме.

*КС: магнетрон, режим синхронизации, резонаторная система, сопротивление, частотная зависимость, коэффициент отражения, неоднородность*

## FREQUENCY DEPENDENCE OF RESONATOR SYSTEM RESISTANCE OF A MAGNETRON AND ITS INFLUENCE ON ITS WORK IN SYNCHRONIZATION MODE

M. A. Fursaev

*SSTU named after Gagarin Yu.A., Saratov*

The frequency dependence resonator system resistance of a magnetron operating in synchronization mode has been analyzed in the presence of inhomogeneity between its output and the circulator. The influence of this dependence on the magnetron operation conditions in this mode is considered.

*Keywords: magnetron, synchronization mode, resonator system, resistance, frequency dependence, reflection coefficient, inhomogeneity*

Анализ работы магнетрона в режиме синхронизации обычно проводится при предположении эквивалентности этого режима и режима генерации при рассогласованной нагрузке, что позволяет оценивать значения электрических параметров прибора в таком режиме по данным относительно величины затягивания частоты магнетрона, представляемым на круговой диаграмме в области значения фазы коэффициента отражения, равного  $180^\circ$  [1, 2]. В этой области происходит максимальное изменение генерируемой частоты при изменении фазы коэффициента отражения нагрузки.

При таком анализе не учитывается факт, что переход магнетрона с генерируемой частоты на частоту синхронизирующего сигнала сопровождается изменением состояния пространственного заряда. Такой переход может происходить при определенных соотношениях амплитуд ВЧ электрического поля резонаторной системы на генерируемой частоте и частоте синхронизирующего сигнала, которые, к тому же, зависят от разницы между этими частотами.

Кроме того, не учитывается ограничение работы магнетрона при больших токах из-за срыва колебаний, происходящего при малых величинах ВЧ электрического поля резонаторной системы, при которых работают магнетроны в режиме синхронизации.

Величина ВЧ-поля резонаторной системы магнетрона зависит, кроме нагруженной добротности, и от ее сопротивления. Поэтому анализ работы магнетрона в режиме синхронизации должен проводиться с учетом как параметров его резонаторной системы, так и ее зависимости от частоты, которые, в свою очередь, определяются составом резонаторной системы. В настоящей работе проводятся исследования характеристик резонаторной системы магнетрона, работающего в режиме синхронизации, при наличии неоднородности между его выходом и циркулятором [2]. Их результаты позволяют учесть влияние на работу магнетрона в таком режиме параметров его резонаторной системы и частотной зависимости ее сопротивления.

Резонаторная система магнетрона представляется в виде параллельного соединения двух двухполюсников, один из которых отражает собственно резонатор прибора, второй – нагрузку. Поэтому проводимость резонаторной системы равна сумме проводимостей резонатора и нагрузки, учитывающей наличие передающей линии и трансформирующего действия выходного устройства магнетрона. Соотношение для первой из этих проводимостей при малой величине отличия частоты  $\Delta f$  от резонансной  $f_p$  может быть записано как

$$Y_{\text{к}} = G_{\text{п}} \left( 1 + jQ_0 \frac{\Delta f}{f_p} \right), \quad (1)$$

где  $G_{\text{п}}$  – активная компонента проводимости резонатора;  $Q_0$  – его собственная добротность. Соотношение для проводимости нагрузки имеет вид

$$Y'_{\text{н}} = \alpha_{\text{т}}^2 Y_0 \frac{1 - k^2 + 2jk \sin \Psi}{1 + k^2 + 2k \cos \Psi}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\text{т}}^2$  – коэффициент трансформации выходного устройства магнетрона;  $Y_0$  – волновая проводимость передающей линии между магнетроном и нагрузкой;  $k$  и  $\Psi$  – модуль и фаза коэффициента отражения нагрузки. Фазой  $\Psi$  учитывается также длина передающей линии.

Соотношения (1) и (2) при условии, что

$$G_{\text{п}} \ll \alpha_{\text{т}}^2 Y_0 k_a,$$

где  $k_a = \frac{1 - k^2}{1 + k^2 + 2k \cos \Psi}$ , позволяют для проводимости резонаторной системы магнетрона при рассогласованной нагрузке записать

$$Y = \left( G_{\text{п}} + \alpha_{\text{т}}^2 Y_0 \right) \sqrt{k_a^2 + \left( 2Q_{\text{н}} \frac{\Delta f}{f_p} + k_{\text{п}} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{н}}$  – нагруженная добротность резонаторной системы;  $k_{\text{п}} = \frac{2k \sin \Psi}{1 + k^2 + 2k \cos \Psi}$ .

С учетом, что  $G_{\text{п}} + \alpha_{\text{т}}^2 Y_0$  определяет проводимость этой системы на резонансной частоте,

соотношение (3) может быть преобразовано в соотношение для сопротивления системы на частоте, отличающейся от резонансной частоты  $f_p$ :

$$Z = \frac{\rho_0}{\sqrt{k_a^2 + \left(2Q_H \frac{\Delta f}{f_p} + k_p\right)^2}}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – сопротивление резонаторной системы на резонансной частоте  $f_p$  при согласованной нагрузке.

Соотношение (4) описывает резонансную кривую резонаторной системы магнетрона и используется при оценке ширины частотного диапазона при его работе в режиме синхронизации. При этом идеализируется циркулятор, а нагрузкой является неоднородность между магнетроном и циркулятором. Полагается, что неоднородность выполнена в виде диафрагмы, называемой рассогласователем.

Электрическая длина между магнетроном и рассогласователем в диапазоне синхронизации не остается неизменной. Поэтому необходимо учитывать зависимость фазы  $\Psi$  коэффициента отражения от частоты. Если считать эту зависимость линейной, то можно использовать соотношение

$$\Psi = \Psi_0 + A \frac{\Delta f}{f_p}, \quad (5)$$

где  $\Psi_0$  – фаза, соответствующая центру полосы синхронизации, а  $A$  – коэффициент, учитывающий степень зависимости от частоты электрической длины между магнетроном и рассогласователем.

Ниже приводятся данные расчета частотной зависимости сопротивления резонаторной системы магнетрона, которые используются при оценке влияния параметров этой системы на условия работы прибора в режиме синхронизации.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости от частоты нормированной величины сопротивления резонаторной системы магнетрона при наличии рассогласователя на его выходе (отнесенной к величине сопротивления системы на резонансной частоте) для ряда значений модуля коэффициента отражения и двух значений фазы  $\Psi_0$ , соответствующих центру полосы синхронизации. Это значения  $0^\circ$  и  $180^\circ$ , при которых сопротивления рассогласованной нагрузки имеют экстремальные значения. Сопротивление резонаторной системы при наличии рассогласователя с модулем коэффициента отражения  $k$  на резонансной частоте системы определяется как

$$\rho_k = \frac{\rho_0}{k_a}. \quad (6)$$

На этом же рисунке приведена аналогичная зависимость сопротивления резонаторной системы от частоты при согласованной нагрузке ( $k = 0$ ).

Как видно, зависимости на рис. 1 имеют вид типичных резонансных кривых. При фазе  $\Psi_0 = 0^\circ$  увеличение модуля коэффициента отражения  $k$  приводит к сужению резонансной кривой, что свидетельствует об увеличении добротности резонаторной системы относительно этой величины при согласованной нагрузке. При фазе  $\Psi_0 = 180^\circ$  в случае увеличения величины  $k$  (при малых величинах  $k$ ) расширяется резонансная кривая и уменьшается добротность системы. Из этого следует, что для увеличения ширины полосы синхронизации электрическая длина между магнетроном и рассогласователем должна быть равной  $180^\circ$ , что находится в соответствии

с [1, 2]. При фазе  $\Psi_0 = 180^\circ$  уменьшается зависимость сопротивления резонаторной системы от частоты. В результате увеличивается ширина полосы частот, в которой обеспечивается необходимое для перехода магнетрона в режим синхронизации соотношение между амплитудами ВЧ электрических полей резонаторной системы на частоте синхронизирующего сигнала и в генераторном режиме.

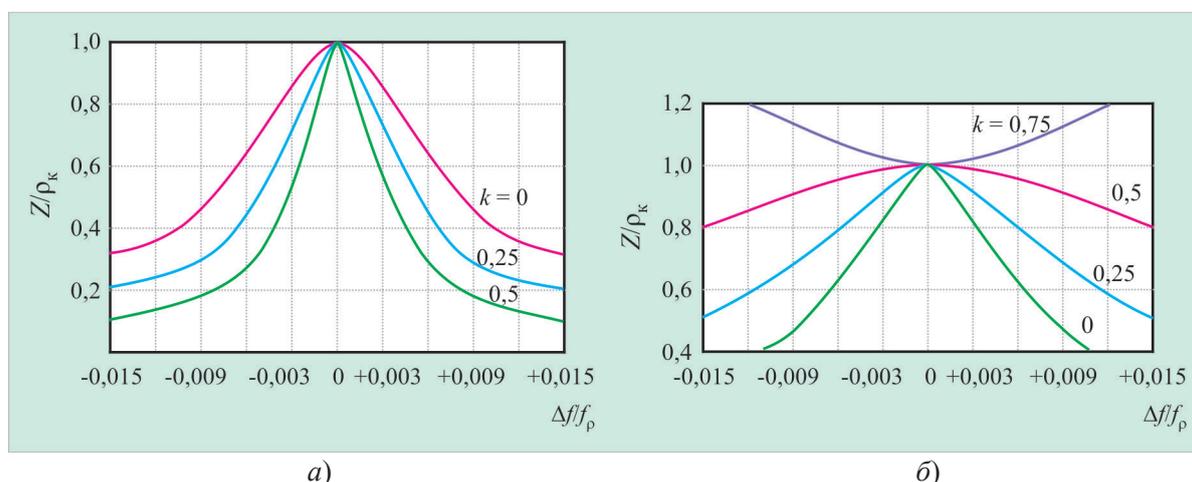


Рис. 1. Частотные зависимости нормированной величины сопротивления резонаторной системы магнетрона для значений фазы  $\Psi_0 = 0^\circ$  (а) и  $\Psi_0 = 180^\circ$  (б) (при  $Q_n = 100$ ,  $A = 500^\circ$ )

Различие в изменении добротности резонаторной системы при рассогласованной нагрузке от фазы  $\Psi_0$  связано с тем, что представленные на рис. 1 зависимости являются, по существу, суммой зависимостей сопротивления рассогласованной нагрузки от фазы коэффициента отражения и резонансной кривой резонаторной системы при согласованной нагрузке. При  $\Psi_0 = 0^\circ$  сопротивление нагрузки уменьшается при удалении от резонансной частоты резонаторной системы, а при фазе  $\Psi_0 = 180^\circ$  эта величина увеличивается при удалении от резонансной частоты. Между тем величина сопротивления резонаторной системы в случае согласованной нагрузки при удалении от резонансной частоты уменьшается.

Наряду с изложенным выше, как следует из соотношения (7), при фазе  $\Psi_0 = 180^\circ$  увеличение модуля коэффициента отражения рассогласователя сопровождается уменьшением сопротивления резонаторной системы, как показано на рис. 2. Это должно учитываться при оценке ширины полосы синхронизации, поскольку при уменьшении сопротивления этой системы уменьшается ток срыва в режиме синхронизации. Аналогичное уменьшение тока срыва происходит в магнетроне при работе в генераторном режиме [3, 4]. С уменьшением тока срыва уменьшается мощность, которую можно получить в приборе.

На рис. 3 приведены частотные зависимости сопротивления резонаторной системы магнетрона для значения модуля коэффициента отражения рассогласователя, равного 0,25, и двух значений параметра  $A$ :  $500^\circ$  и  $2000^\circ$ . При  $A = 500^\circ$  и  $0^\circ$  эти зависимости практически одинаковы, а величина фазы  $\Psi$  при  $A = 2000^\circ$  с изменением частоты изменяется в четыре раза больше, чем при  $A = 500^\circ$ , что соответствует изменению электрической длины между магнетроном и рассогласователем в четыре раза. Как следует из приведенных данных, при анализе работы магнетрона в режиме синхронизации изменение фазы  $\Psi$  при изменении частоты может не учитываться, если мало значение модуля коэффициента отражения рассогласователя, а электрическая длина между

ним и магнетроном не превышает пяти длин волн. Эта величина увеличивается при уменьшении модуля коэффициента отражения рассогласователя.

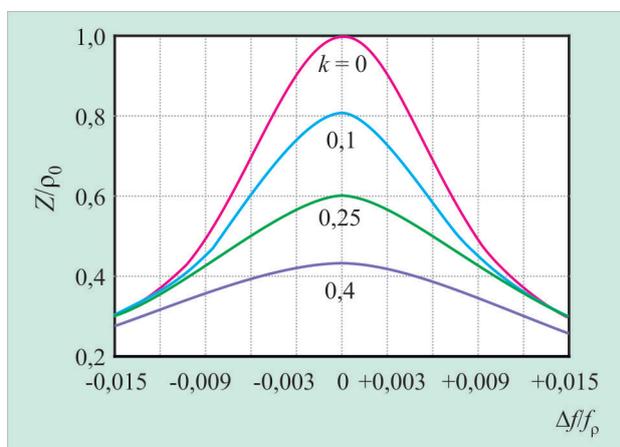


Рис. 2. Частотные зависимости сопротивления резонаторной системы магнетрона для ряда значений модуля коэффициента отражения рассогласователя ( $\Psi_0 = 180^\circ$ ,  $Q_n = 100$ ,  $A = 500^\circ$ )

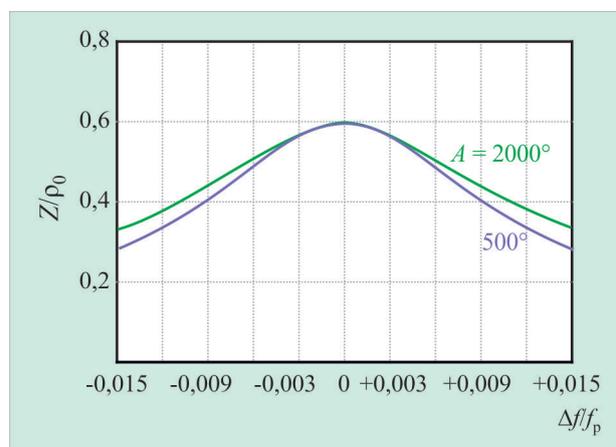


Рис. 3. Частотные зависимости сопротивления резонаторной системы магнетрона для двух значений параметра  $A$  ( $k = 0,25$ ,  $\Psi_0 = 180^\circ$ ,  $Q_n = 100$ )

Проведенный анализ частотной зависимости сопротивления резонаторной системы магнетрона, работающего в режиме синхронизации, при наличии рассогласующего элемента между прибором и циркулятором позволяет учесть влияние этого элемента на ширину частотной полосы синхронизации. Результаты получены в предположении идеализации параметров циркулятора и линии между ним и магнетроном. Очевидно, что это должно учитываться при моделировании работы магнетрона в режиме синхронизации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дэйвид, Э. Фазирование высокочастотными сигналами / Э. Дэйвид; пер. с англ.; под ред. М. М. Федорова // Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. Т. 2. – М.: ИЛ., 1961. – 327 с.
2. Каргин, А. Н. Синхронизация СВЧ-генераторов при рассогласованной нагрузке / А. Н. Каргин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 2. – С. 22 – 25.
3. Каргин, А. Н. Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи / А. Н. Каргин // Генераторы и усилители СВЧ. – М.: Радиотехника, 2005. – С. 184 – 199.
4. Фурсаев, М. А. Зависимость параметров магнетрона в режиме срыва генерации от параметров нагрузки / М. А. Фурсаев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 3 (538). – С. 59 – 63.

Статья поступила 5 марта 2019 г.

УДК 621.385.6

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ОКСИДНОГО КАТОДА МАГНЕТРОНА

А. Н. Каргин<sup>1</sup>, А. М. Соколов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

<sup>2</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Предложена аналитическая тепловая модель оксидного катода, учитывающая потери тепла излучением и теплопроводностью по держателям катода. Физическая модель представляет собой тело, нагретое в вакууме до определенной температуры, и описывается уравнением теплового баланса. Коэффициенты модели определяются по характеристикам, полученным при пирометрировании катодов в реальных магнетронах. Модель можно использовать для расчета температуры катода в особых режимах при изменении температуры среды или откачке.

*КС: магнетрон, оксидный катод, тепловая модель*

## ANALYTICAL THERMAL MODEL OF MAGNETRON OXIDE CATHODE

A. N. Kargin<sup>1</sup>, A. M. Sokolov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CJSC «RPE «Magratep», Fryazino

<sup>2</sup>JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

An analytical thermal model of an oxide cathode is suggested, which takes into account heat loss due to radiation and thermal conductivity on cathode holders. The physical model is a body heated in vacuum up to a certain temperature and described by a heat balance equation. The coefficients of the model are determined by characteristics obtained by pyrometry of the cathodes in real magnetrons. The model can be used to calculate the cathode temperature in special modes when the temperature of the environment changes or at pumping out.

*Keywords: magnetron, oxide cathode, thermal model*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оксидный катод достаточно широко применяется в современных ЭВП СВЧ, в том числе в магнетронах. Правильный выбор теплового режима катода определяет эффективность и долговечность прибора. Несмотря на впечатляющие успехи компьютерного моделирования во многих областях, до сих пор проектирование катодно-подогревательного узла осуществляется в значительной степени с помощью полуэмпирических средств [1–4]. Причинами такого положения являются сложность конструкции, слабая сходимость результатов расчетов и экспериментов, обусловленная использованием в расчетах многих теплофизических характеристик материалов, известных весьма неточно. Зачастую требуется «подгонка» компьютерной модели под эксперимент [5]. Однако для решения ряда практических инженерных задач можно применить простые аналитические модели, позволяющие быстро изучить поведение объекта.

В настоящей статье описано, как на основе результатов пирометрирования оксидного катода строится математическая модель, используемая затем для расчетов температуры катода в различных режимах и условиях, не всегда доступных для эксперимента.

## 2. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ

В данной работе проводится тепловой анализ оксидного катода миниатюрного магнетрона в диодном режиме (без генерации) [6]. Катод косвенного накала представляет собой тонкостенную Ni-трубку, закрепленную соосно в полюсных наконечниках. На длине  $L_k$  нанесено оксидное покрытие диаметром  $d_k$ . На непокрытых концах трубки сделаны отверстия для увеличения теплового сопротивления (рис. 1).

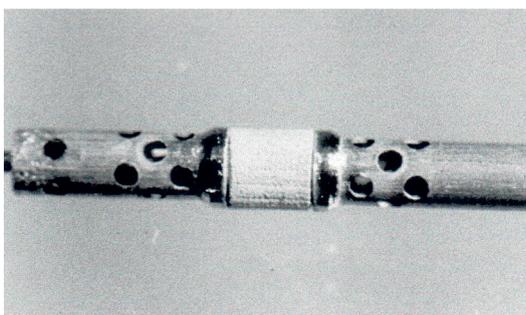


Рис. 1. Катод магнетрона

Отвод тепла от катода осуществляется за счет излучения оксидного слоя и теплопроводности концов керна. Если принять температуру поверхности оксидного слоя одинаковой, то уравнение теплового баланса имеет вид

$$P_n = h_{\text{изл}}(T_k^4 - T_0^4) + G_t(T_k - T_0), \quad (1)$$

где  $h_{\text{изл}}$  – коэффициент излучения поверхности оксидного слоя, Вт/К<sup>4</sup>;  $T_k$  – температура катода, К;  $T_0$  – температура корпуса (анодного блока), К;  $G_t$  – тепловая проводимость концов керна (держателей), Вт/К;  $P_n$  – мощность накала, Вт.

Для составления аналитической модели необходимо знать коэффициент излучения  $h_{\text{изл}}$  и тепловую проводимость  $G_t$ , но из-за сложности конструкции невозможно заранее оценить величину  $G_t$ .

С другой стороны, коэффициент излучения поверхности определяется так:

$$h_{\text{изл}} = \sigma \varepsilon_{\text{ч}} S_k, \quad (2)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{\text{ч}}$  – коэффициент черноты поверхности;  $S_k$  – площадь поверхности оксидного слоя катода. Однако коэффициент черноты поверхности катода известен лишь приближенно [7].

В таком случае предлагается определить требуемые величины  $h_{\text{изл}}$  и  $G_t$  по результатам пирометрирования.

Дифференцируя уравнение (1) по аргументу  $T_k$ , получим выражение для наклона характеристики пирометрирования:

$$dP_n / dT_k = 4h_{\text{изл}}T_k^3 + G_t. \quad (3)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = h_{\text{изл}}, \quad x_2 = G_t, \quad b_1 = P_n, \quad b_2 = dP_n / dT_k.$$

Из выражений (1), (3) составим систему двух уравнений в каноническом виде:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1, \quad (4.1)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2, \quad (4.2)$$

где  $a_{11} = T_k^4 - T_0^4$ ,  $a_{12} = T_k - T_0$ ,  $a_{21} = 4T_k^3$ ,  $a_{22} = 1$ ,  $b_1 = P_n$ ,  $b_2 = dP_n / dT_k$ .

Далее неизвестные  $x_1$  и  $x_2$  находим методом Крамера [8] через определители:

$$D_0 = (T_k^4 - T_0^4) - 4T_k^3(T_k - T_0), \quad (5.1)$$

$$D_1 = P_n - (dP_n / dT_k)(T_k - T_0), \quad (5.2)$$

$$D_2 = (dP_n / dT_k)(T_k^4 - T_0^4) - 4P_n T_k^3. \quad (5.3)$$

Получаем искомые коэффициенты для модели:

$$x_1 = D_1 / D_0 = h_{изл}, \quad (6.1)$$

$$x_2 = D_2 / D_0 = G_t. \quad (6.2)$$

Таким образом, в рабочей точке ( $T = T_k$ ,  $P = P_n$ ) на кривой пирометрирования нужно определить наклон  $dP_n / dT_k$  и вычислить коэффициенты тепловой модели  $h_{изл}$  и  $G_t$ . Затем, используя их как константы, по уравнению (1) можно рассчитать температуру катода при любых значениях мощности накала  $P_n$  и температуры корпуса  $T_0$ . С другой стороны, изменяя константы, можно оценить чувствительность  $T_k$  к изменению теплофизических характеристик.

Несмотря на кажущуюся громоздкость формул, расчет легко проводится в программе «EXCEL».

Заметим, что предложенная модель достаточно универсальна, так как при составлении уравнения баланса катодный узел рассматривался нами как «черный ящик», без конструктивной детализации. По сути, модель представляет собой твердое тело, нагретое в вакууме до определенной температуры и охлаждаемое вследствие теплового излучения, пропорционального 4-й степени температуры, и потерь за счет теплопроводности, линейно зависящих от температуры. Коэффициенты модели определяются по кривой пирометрирования: температуре катода  $T_k$  и ее наклону  $dT_k / dP_n$  при мощности накала  $P_n$ . Таким образом, модель применима для анализа катодов различных типов ЭВП, которые можно описать уравнением теплового баланса (1). Миниатюрный магнетрон использовался в данном случае как удобный объект исследования.

### 3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПИРОМЕТРИРОВАНИЯ

Пирометрирование проводилось на макетах с окном, изготовленных в процессе серийного производства магнетронов. Питание цепи накала осуществлялось от стабилизированного источника, напряжение и ток накала измерялись цифровыми приборами с высокой точностью. Благодаря малой мощности накала (3...5 Вт), корпус магнетрона при рабочем накале и естественном охлаждении имел температуру  $T_0 \approx 40$  °С (313 К). Результаты пирометрирования макета были предварительно обработаны, как показано на рис. 2.

Точки аппроксимирующей линейной функции (линии тренда) затем вводились в таблицу Excel (рис. 3). При расчетах истинной температуры авторами принята поправка к яркостной температуре  $dT_{ист} = 35$ °, исходя из особенностей оксидного покрытия и предыдущего опыта [2].

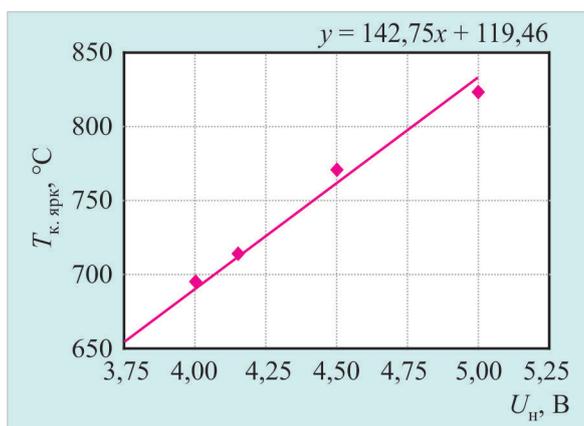


Рис. 2. Зависимость температуры катода макета № 1206 от напряжения накала:

••• экспериментальные точки; – график аппроксимирующей функции

### ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ КПУ

1. Исходные данные пирометрирования - макет №

1206

а) Определение наклона  $dT_k \backslash dP_n$

|        |       |
|--------|-------|
| Uн, В  | 4,5   |
| Rх, Ом | 1,946 |
| Rг, Ом | 5,175 |
| dR/dU  | 0,190 |

|           |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Uн, В     | 4     | 4,25  | 4,5   | 4,75  | 5     |
| Jн, А     | 0,802 | 0,836 | 0,870 | 0,902 | 0,933 |
| Pн, Вт    | 3,206 | 3,554 | 3,913 | 4,283 | 4,664 |
| Tк ярк, С | 690   | 727   | 763   | 798   | 833   |

б) параметры уравнения теплового баланса

|          |       |
|----------|-------|
| Uн, В    | 4,5   |
| Pн, Вт   | 3,913 |
| dTист, С | 35    |

|              |     |
|--------------|-----|
| Tк ярк, С    | 763 |
| To, С        | 40  |
| dT/dPн, С/Вт | 98  |

|           |      |
|-----------|------|
| Tк ист, К | 1071 |
| To, К     | 313  |

2. Решение методом Крамера

|      |            |
|------|------------|
| D =  | -2,419E+12 |
| D1 = | -3,831     |
| D2 = | -5,884E+09 |

|            |          |
|------------|----------|
| hизл, Вт/К | 1,58E-12 |
| Gt, Вт/К   | 2,43E-03 |
| Rt, К/Вт   | 411      |

|          |       |
|----------|-------|
| Ризл, Вт | 2,069 |
| Pt, Вт   | 1,844 |

3. Моделирование диодного режима

а) аналитическая связь  $U_n(P_n)$  :

$$y = Ax + B$$

A = 0,686

B = 1,810

|        |      |      |      |      |      |      |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| Pн, Вт | 3,21 | 3,48 | 3,77 | 4,06 | 4,36 | 4,66 |
| Uн, В  | 4,0  | 4,2  | 4,4  | 4,6  | 4,8  | 5,0  |

б) расчетная характеристика  $T_k(U_n)$

|           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Uн, В     | 3,96 | 4,08 | 4,21 | 4,34 | 4,47 | 4,61 | 4,76 | 4,92 | 5,08 |
| Tк ярк, С | 680  | 700  | 720  | 740  | 760  | 780  | 800  | 820  | 840  |
| Tк ист, К | 988  | 1008 | 1028 | 1048 | 1068 | 1088 | 1108 | 1128 | 1148 |
| Pн, Вт    | 3,14 | 3,31 | 3,49 | 3,68 | 3,88 | 4,09 | 4,31 | 4,53 | 4,77 |

Рис. 3. Тепловая модель макета № 1206 на листе Excel

Расчеты проводятся в следующем порядке: задается яркостная температура катода  $T_k$  и добавляется поправка  $dT_{\text{ист}}$ , рассчитывается мощность накала  $P_n$  и определяется соответствующее напряжение накала  $U_n$ . Предварительно следует определить аналитическую связь  $U_n(P_n)$ : строим экспериментальный график, который аппроксимируем в окрестности рабочей точки ( $U_n = 4,5$  В) прямой линией  $Ax + B$  (рис. 4).

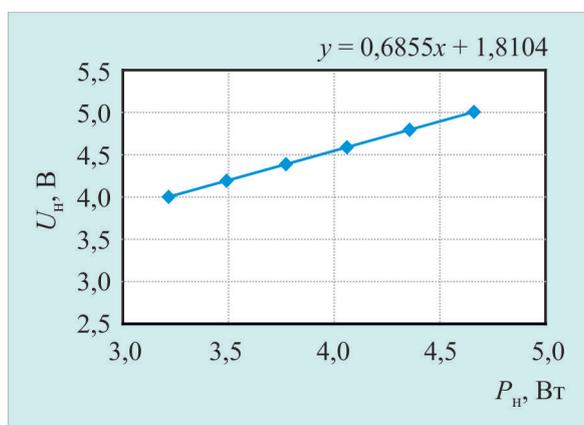


Рис. 4. Зависимость напряжения накала от мощности накала

Как видно из расчетов (рис. 3), мощность излучения оксидного слоя составляет 2,069 Вт (53 %), а мощность теплоотвода по концам трубки – 1,844 Вт (47 %). На рис. 5 показано сравнение расчетных и измеренных температур, которые хорошо согласованы (в пределах 9 °С), характеристика модели  $T_k(U_n)$  близка к линейной.

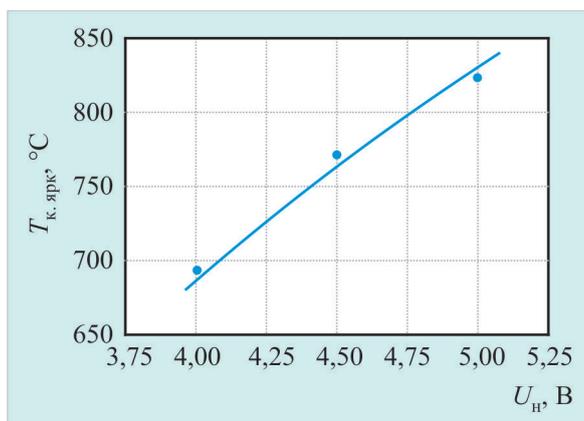


Рис. 5. Расчетная зависимость температуры катода макета № 1206 от напряжения накала (••• экспериментальные точки)

В процессе серийного производства обследованы 23 макета с окном в корпусе. При пирометрировании обнаружено, что  $T_k$  имеет большой разброс от образца к образцу в пределах 115 °С, что привело к необходимости разработки методики, позволяющей устанавливать температуру катода подбором индивидуального напряжения накала [9]. Обработка массива данных позволила определить усредненные тепловые характеристики:  $h_{\text{изл}} = 1,62 \cdot 10^{-12}$  Вт/К<sup>4</sup>,  $G_t = 2,14 \cdot 10^{-3}$  Вт/К.

При этом было выявлено 3 аномальных макета, у которых величина параметра  $G_t$  вышла за допустимые статистические пределы.

Имея значения параметров  $h_{\text{изл}}$  и  $G_p$ , можно рассчитать, например, влияние температуры корпуса магнетрона  $T_0$ , которая изменяется при эксплуатации от  $-60$  до  $150$  °С, а при откачке достигает  $500$  °С (рис. 6).

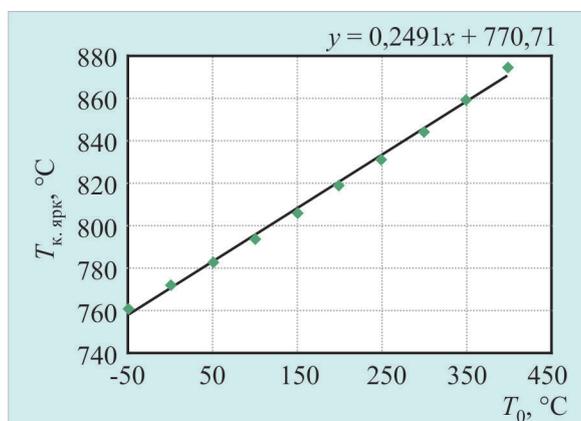


Рис. 6. Расчетная зависимость температуры катода от температуры корпуса

Основные выводы по результатам исследования:

- предложенная модель соответствует результатам пирометрирования, позволяет исключить промахи измерений, а также рассчитать ранее недоступные характеристики;
- температура корпуса существенно влияет на температуру катода:  $0,25$  °С на  $1$  °С изменения температуры корпуса, что обусловлено большой долей тепловых потерь по концам катода (47 %);
- при пирометрировании следует тщательно измерять мощность накала и наклон характеристики  $dT_{\text{к}} / dU_{\text{ц}}$ , существенно влияющих на точность расчета  $G_p, h_{\text{изл}}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена аналитическая тепловая модель катода, описываемая уравнением теплового баланса, учитывающим излучение и потери тепла по держателям катода. Измерив пирометром температуру катода и скорость ее изменения от мощности накала, можно определить удельную мощность излучения и тепловое сопротивление держателей катода. Результаты расчетов соответствуют экспериментальным данным пирометрирования.

Модель позволяет рассчитать температуру катода в особых режимах (изменение температуры среды, откачка).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Царев, Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп / Б. М. Царев. – М.: Энергия, 1967.
2. Никонов, Б. П. Оксидный катод / Б. П. Никонов. – М.: Энергия, 1979.
3. Киселев, А. Б. Металлооксидные катоды электронных приборов / А. Б. Киселев. – М.: Издательство МФТИ, 2001.
4. Кошелев, В. С. К вопросу о тепловом КПД торцевых катодов СВЧ-приборов / В. С. Кошелев, Б. П. Никонов, Г. М. Цымбалов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1977. – Вып. 4. – С. 13 – 19.
5. Sattorov, M. A. Thermal analysis of a strapped magnetron / M. A. Sattorov et al. // IEEE Trans. on Electron Device. – Aug. 2011. – Vol. 58, No 8. – P. 2784 – 2788.
6. Каргин, А. Н. Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи / А. Н. Каргин // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 62 – 66.

7. **Виноградов, Д. П.** Коэффициенты излучения рабочих поверхностей оксидных катодов / Д. П. Виноградов, В. П. Монастырев // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1978. – Вып. 1. – С. 55 – 57.
8. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970.
9. **Каргин, А. Н.** Явления на поверхности оксидного катода в магнетроне / А. Н. Каргин, А. М. Соколов // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 69 – 70.

Статья поступила 25 февраля 2019 г.

### === НОВЫЕ КНИГИ ===

**ЕФРЕМОВА М. В., ИВАНОВ И. М., КУРУШИН А. А. Моделирование СВЧ-приборов с помощью программы CST Particle Studio.** – М.: СОЛОН-Пресс, 2019. – 332 с.

Книга посвящена моделированию устройств с носителями зарядов. Это электронные лампы, клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны. Моделирование и проектирование таких приборов выполняется с помощью современных систем проектирования, в качестве которой выбрана система CST STUDIO SUITE и её утилита CST Particle Studio. Программа разработана основанной в 1992 году компанией CST, которая активно работает в области мультифизических САПР СВЧ.

Книга предназначена для студентов радиотехнических и электронных специальностей, аспирантов и специалистов, занятых в области проектирования электронных СВЧ-приборов.

**СОМОВ А. М., КАБЕТОВ Р. В. Многолучевые зеркальные антенны: геометрия и методы анализа.** – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 256 с.

Рассмотрены вопросы проектирования и расчета характеристик многолучевых зеркальных антенн, входящих в состав наземных и бортовых радиотехнических устройств связи. Проведено полное систематизированное описание геометрии зеркальных антенн. Описаны модели типовых облучателей. Изложены известные и новые методы расчета характеристик зеркальных антенн, а также методы оптимизации их геометрических параметров.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в области теории и техники зеркальных антенн.

# ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6

## ТЕРМОПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ В КОРПУСЕ

Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, А. В. Батулин, И. Ю. Булаев

*ООО «Космос Комплект», г. Москва*

Высокая плотность компоновки систем в корпусе, которая определяется интеграцией нескольких полупроводниковых кристаллов, дискретных активных и пассивных компонентов, МЭМС и т. п., приводит к значительному увеличению выделяемой тепловой энергии на единицу объема корпусированной системы. В связи с этим важным этапом процесса проектирования таких систем является их термоанализ, как в статике, так и в динамическом режиме. В статье представлены соответствующие механизмы вывода тепла, рассмотрены типовые каналы реализации этого вывода и их термальные сопротивления. Представлены общие принципы термального проектирования и подход к применению термальных выводов в подложках с целью повышения их системной эффективности.

*КС: термальное проектирование, СВЧ-компонент, система в корпусе*

## THERMAL DESIGN OF MICROWAVE COMPONENTS AND ELECTRONIC SYSTEMS IN A PACKAGE

N. S. Danilin, D. M. Dimitrov, A. V. Baturin, I. Yu. Bulaev

*CJSC «Cosmos Complect», Moscow*

The high packaging density of the systems, which is determined by the integration of several semiconductor crystals, discrete active and passive components, MEMS, etc., leads to a significant increase in thermal energy released per unit volume of the packaged system. In this regard, an important stage of the designing process of such systems is their thermal analysis both in statics and in a dynamic mode. The article presents the relevant mechanisms of heat removal, and considers the typical channels for the implementation of this output and their thermal resistances. The general principles of thermal design and the approach to the use of thermal outputs in substrates with the aim of increasing their system efficiency are presented.

*Keywords: thermal design, microwave component, packaged system*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Термопроектирование СВЧ-компонентов и систем в корпусе (СвК) непосредственно связано с их надежностью [1]. Воздействие тепла, возникающего в СвК, форсирует ряд механизмов возникновения неисправностей и сбоев, например: химические реакции, диффузионные эффекты, пробой в диэлектрических слоях, движение ионов, электромиграционные процессы, ползучесть материалов, усталость паяных соединений, изменения в геометрии подложек, дрейф параметров компонентов и др.

Жизненный цикл СвК в зависимости от температуры в корпусе показан на рис. 1.

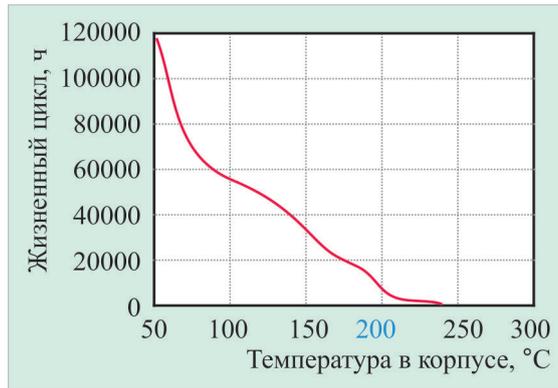


Рис. 1. Жизненный цикл СвК в зависимости от температуры

Объектом термодизайна СвК является многогранный процесс вывода тепла из под-корпусного пространства. Это включает разные аспекты, такие, как теплопроводность, конвекция и излучение, флуктуации в подкорпусном пространстве, анализ эмпирических данных, цифровое моделирование, экспериментальные практики и др.

Вывод тепла из СвК – это эмпирическая наука. Точный прогноз тепловых процессов в этом случае – весьма тяжелая задача, которая требует экспертного потенциала, точного подбора инструментов для численного анализа и моделирования.

Этот этап проектирования СвК нельзя заменить «предыдущим опытом». Его надо проводить по каждому отдельному проекту заново. При этом всегда, когда возможно, надо проводить промежуточное тестирование для текущей фазы проекта.

Цель данной работы – привести обобщенное описание применяемой в ООО «Космос Комплект» методологии системного термодизайна СвК и указать на некоторые существенные особенности СвК, которые позволяют вести успешное термодизайнение [2].

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО ТЕРМОДИЗАЙНА СвК

Системное термодизайнение СвК включает два этапа:

1. Термомоделирование СвК.
2. Анализ результатов моделирования.

Обобщенная схема процесса термомоделирования представлена на рис. 2.

Следует отметить, что процесс моделирования итеративный, т. е. после анализа результатов группой проектирования СвК, как правило, происходит изменение ряда условий, которые учитываются в моделях, как например: конструкция, компоновка изделия, замена компонентов и т. д.

## 3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СвК

### 3.1. Механизмы вывода тепла

Три базовых физических механизма существенно влияют на процесс тепловыведения – теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. В СвК тепловая энергия генерируется в активных компонентах и, прежде всего, передается и распределяется в подложке из-за теплопроводности компонентов и подложки, а после этого конвекционным способом переходит в ок-

ружающую среду (как правило, воздух). Тепловым излучением можно пренебречь в ряде случаев в связи с небольшой абсолютной разницей в температурах между системой и окружающей средой.

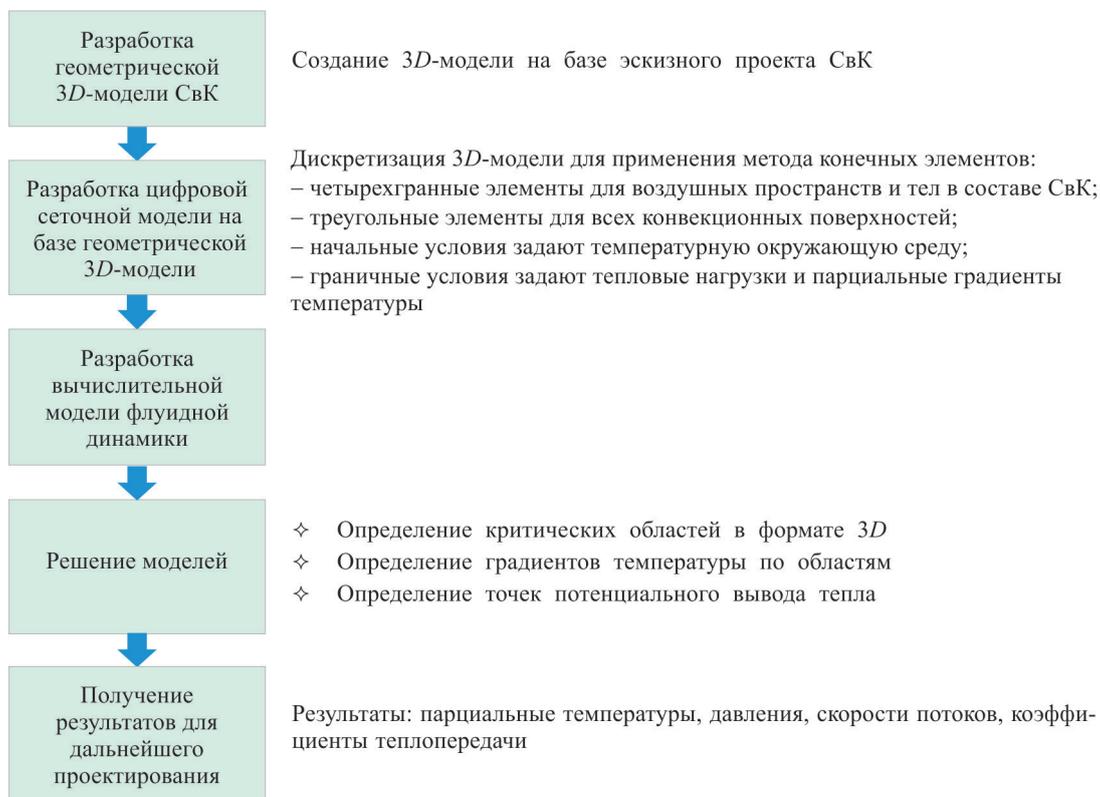


Рис. 2. Обобщенная схема термомоделирования

**Теплопроводность.** Теплопроводность определяется интермолекулярным трансфером кинетической энергии и доминирующим механизмом теплопередачи на основе закона Фурье:

$$J_{th} = kA(T_2 - T_1)/l,$$

где  $J_{th}$  – тепловой поток;  $A$  – площадь сечения тела;  $l$  – длина пути передачи тепла;  $T_1, T_2$  – температуры холодного и горячего концов;  $k$  – коэффициент теплопроводности материала (рис. 3).

Теплопроводность при этом определяется как

$$R_{th} = (T_2 - T_1)/J_{th} = l/k \cdot A.$$

Теплопроводность варьируется в широких пределах: у полимеров она составляет 0,1...1 Вт/см<sup>2</sup>, а у металлов – 50...400 Вт/см<sup>2</sup>.

**Конвекция.** Это транспорт энергии за счет теплового потока. Тепло передается за счет теплопроводности граничной поверхности тела к потоку при его контакте с граничной поверхностью за счет сил трения, которые возникают при этом (рис. 4).

Если движение потока происходит за счет его естественного протекания, то это естественная конвекция, а если протекание обеспечено за счет внешнего воздействия, то это вынужденная конвекция. Потоки с малой скоростью протекания являются ламинарными, а при большой

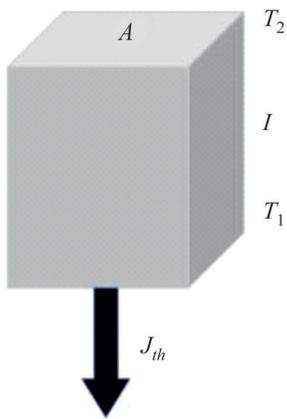


Рис. 3. Схема передачи тепловой энергии на базе теплопроводности

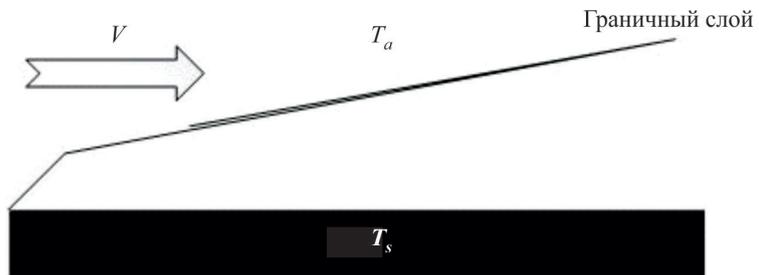


Рис. 4. Принцип конвекции

скорости – турбулентными. У турбулентного потока более тонкий пограничный слой и поэтому вывод тепла происходит более эффективно. Тепловой поток от поверхности тела определяется как

$$J_{th} = hA(T_s - T_a),$$

где  $A$  – площадь поверхности;  $T_s$  – температура поверхности и  $T_a$  – температура потока;  $h$  – коэффициент теплообмена. Для свободной конвекции в воздухе этот коэффициент равен  $0,3 \dots 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а для вынужденной конвекции – от 10 до 200 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и, как правило, зависит от скорости движения воздуха.

Тепловое излучение. Это теплопередача за счет электромагнитной энергии. Тепловой поток пропорционален четвертой степени абсолютной температуры.

### 3.2. Пути вывода тепла

Есть множество методов обеспечения тепловыделения из СвК. Они предлагают возможные пути трансфера тепла со стороны компонентов к внешнему источнику охлаждения. Такие типичные источники представлены на рис. 5 и 6.

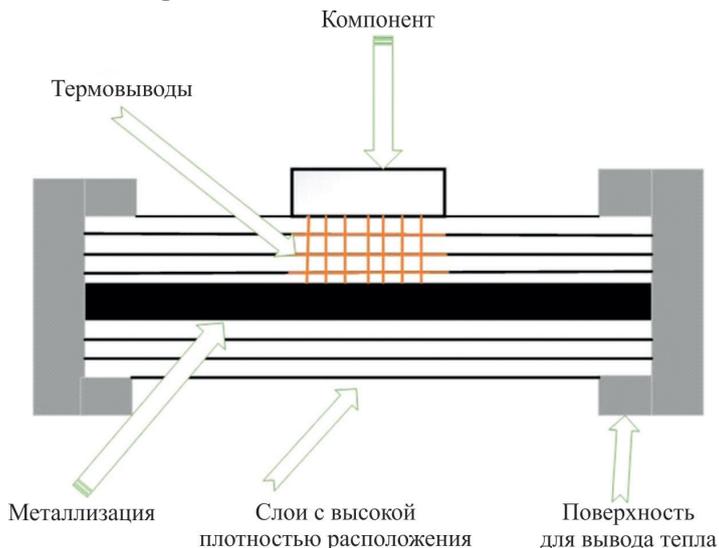


Рис. 5. Пример источника охлаждения за счет граничной поверхности

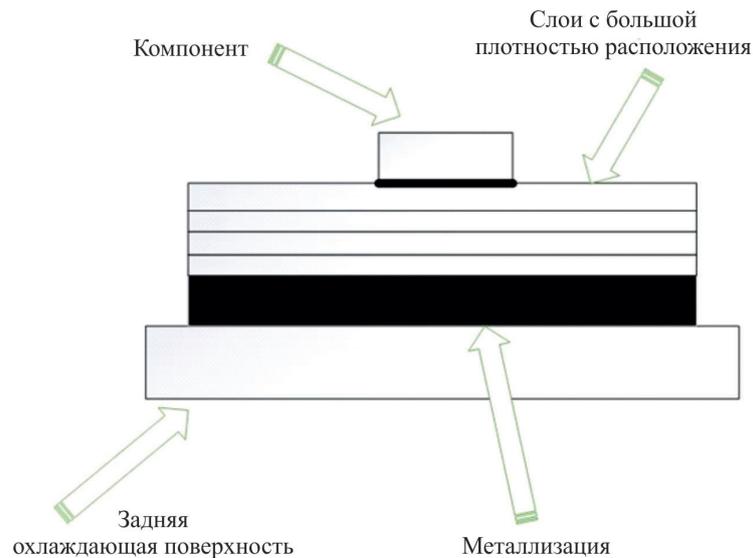


Рис. 6. Пример источника охлаждения за счет поверхности, расположенной сзади

### 3.3. Рекомендации к термальному проектированию

При проектировании подложек и выборе корпусов следует придерживаться некоторых рекомендаций:

- Выбирать материалы с хорошей теплопроводностью.
- Подложка должна быть достаточно тонкой, чтобы обеспечить оптимальное распределение выделяемого тепла. Если подложка расположена на радиаторе, он также должен быть тонким, так как будет действовать в качестве теплораспределителя.
- Располагать компоненты на подложке со стороны самого большого тепловыделения.
- Не располагать компоненты с большим тепловыделением вблизи границ подложки.
- Если применяется вынужденная конвекция, располагать поверхность компонентов с большим тепловыделением в сторону движения потока. Не располагать компоненты с большим тепловыделением поперек потока.
- Обеспечить максимальную площадь расположения для силовых резисторов.
- Разварку кристаллов производить, по возможности, более тонким проводом.
- Увеличить теплоотдачу подложки за счет дополнительных термальных переходов.

### 3.4. Термальные переходы

Они предназначены для уменьшения на порядок термального импеданса поверхности под активным компонентом. Для этой цели на подложке под компонентами устанавливаются площадки из меди. В подложке реализуются несколько глухих переходов, по которым тепло проводится к металлизации. Эти переходы могут быть просверлены механическим путем или лазером, после чего металлизуются медью. Такой подход не очень популярен, так как расходует много места со стороны компонентов, а также в слоях подложки. Это может привести к увеличению числа слоев.

Механически просверленные переходы. Такие глухие переходы делаются через все слои с вы-

сокой плотностью. Их диаметр должен быть меньше 0,3 мм, и при этом клиренс между слоями должен позволять необходимый допуск по глубине (рис. 7).

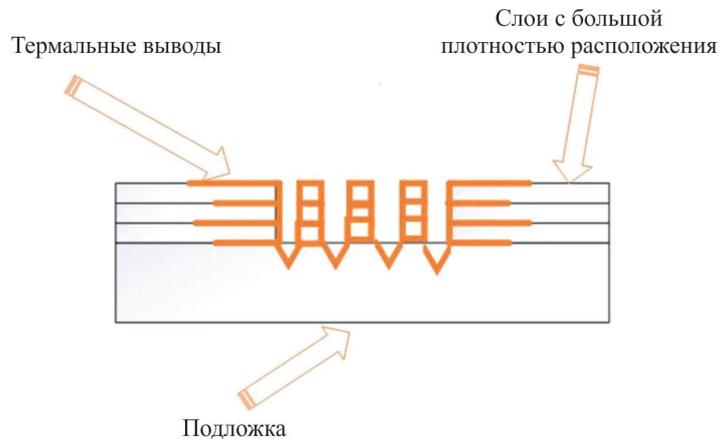


Рис. 7. Механически просверленные переходы

Лазерно просверленные переходы. Диаметр таких переходов меньше 75 мкм, и они не расположены друг над другом, как видно на рис. 8. Размеры контактных площадок компонентов также уменьшены. Эта технология помогает избежать необходимость стыковки переходов.

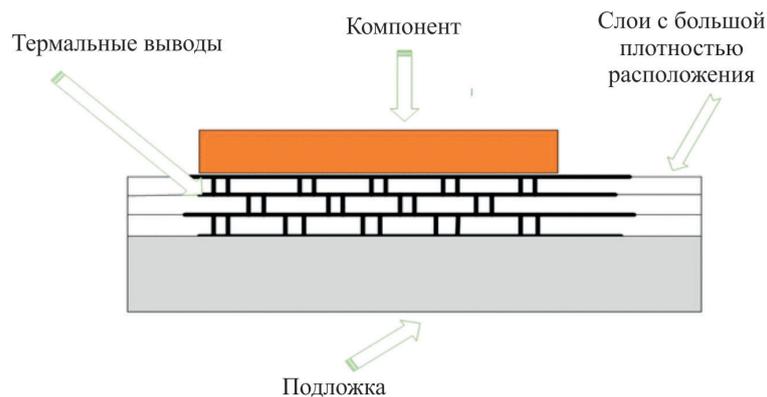


Рис. 8. Переходы, просверленные с помощью лазера

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термальное проектирование СвК является основным этапом их проектирования. Проектирование проводится группой разработчиков в составе механика, схемотехника и специалиста с опытом в термопроектировании и с доступом к инструментам моделирования и численного анализа. Процесс итеративный и осуществляется после каждого этапа общего процесса проектирования. В случае изменения исходных данных по теплопроекту, теплопроектирование повторяется. Нельзя принимать решения по выделению тепла из СвК на базе предыдущих решений.

Термопроектирование занимает примерно 60 % от времени проектирования СвК с более чем четырьмя кристаллами, но является одной из важнейших гарантий требуемого уровня надежности СвК [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин, Н. С. Повышение эффективности работы микропроцессоров в режиме реального времени с применением аппаратных акселераторов для построения высокоскоростной аппаратуры / Н. С. Данилин, Д. М. Дмитриев, И. Ю. Булаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 2(537). – С. 13 – 16.
2. Руководящие материалы по проектированию и производству СвК. – М.: ООО «Космос Комплект», 2014.
3. Euro Practice – SiP, Bull, France, 2012.

Статья поступила 2 апреля 2019 г.

══════ НОВЫЕ КНИГИ ══════

КАТУЛЕВ А. Н., ХРАМИЧЕВ А. А., ЯГОЛЬНИКОВ С. В. **Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов.** Монография. – М.: Радиотехника, 2018. – 408 с.

Разработано новое направление в теории и практике цифровой обработки изображений, формируемых оптико-электронными приборами в сложных условиях функционирования при априорной неопределенности относительно контролируемой фоновой обстановки. Направление основано на вейвлет-фрактально-корреляционных свойствах выборки измерений оптико-электронным прибором.

Для специалистов, проектирующих программные комплексы обработки информации в оптико-электронных информационных системах, а также студентов, аспирантов и преподавателей вузов, занимающихся иконикой и проектированием информационных оптико-электронных систем.

УДК 621.385.6

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ ОПОРНЫЙ СВЧ-ГЕНЕРАТОР НА КООКСИАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ

С. А. Самохин, И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Е. В. Терёшкин, Н. А. Фёдоров

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

Представлены результаты разработки высокостабильного малогабаритного опорного генератора с ФАПЧ и низким уровнем фазовых шумов для применения в аппаратуре специального назначения с рабочей частотой 3,6 ГГц, фазовым шумом (при отстройке 2 кГц) -112 дБн/Гц, относительным уровнем побочных спектральных составляющих менее или равным -70 дБ, выходной мощностью 0...40 мВт.

*КС: опорный генератор, коаксиальный резонатор, многослойная печатная плата, СВЧ-диапазон, фазовый шум*

## SMALL-SIZE REFERENCE MICROWAVE OSCILLATOR ON A COAXIAL RESONATOR

S. A. Samokhin, I. V. Goryunov, V. A. Iovdalskiy, E. V. Tereshkin, N. A. Fyodorov

*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

The results of the development of a high-stable small-size reference oscillator with a phase lock and a low level of phase noise for use in special purpose equipment with operating frequency of 3.6 GHz, phase noise (at 2 kHz tuning out) -112 dBc/Hz, a relative level of side spectral components not more than -70 dB, output power of 0...40 mW are presented.

*Keywords: reference oscillator, coaxial resonator, multilayer printed-circuit board, microwave range, phase noise*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянное ужесточение требований к формирователям частот и сигналов СВЧ-диапазона, предназначенным для различных систем специального назначения, заставляет разработчиков искать новые технические решения для достижения высоких электрических и массогабаритных характеристик. В состав большинства таких систем входят синтезаторы частот различных типов, процесс разработки которых в каждом отдельном случае должен начинаться с анализа комплекса требований, предъявляемых к характеристикам спектра формирователей частот в целом, уровню фазовых шумов, диапазону частот выходного сигнала, времени переключения, а также анализа условий эксплуатации и области применения разрабатываемой аппаратуры. Исходя из этих требований, принимаются конструкторские, технологические и технические решения, а также выбираются компоненты, позволяющие получить требуемые характеристики изделия.

В частности, в гигагерцовом диапазоне частот в состав формирователей входят синтезаторы частот косвенного синтеза, включающие в себя опорные СВЧ-генераторы на диэлектрических или коаксиальных диэлектрических резонаторах, стабилизированные петлей с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), параметры которых в значительной степени определяют

качество системы в целом. В состав рассматриваемого в этой работе опорного СВЧ-генератора с ФАПЧ входят: генератор, управляемый напряжением (ГУН), на коаксиальном диэлектрическом резонаторе, микросхема синтезатора частоты (СЧ), делитель частоты, интегральный направленный ответвитель, усилители СВЧ-сигнала и постоянного тока, стабилизаторы напряжения и загружающий процессор. Учитывая относительную широкополосность микросхем, применяемых в нашем случае, диапазон выходных частот модуля опорного генератора определяется в основном частотным диапазоном ГУН. Характеристики спектральной плотности мощности фазового шума (СПМФШ) ГУН оказывают непосредственное влияние на выходные характеристики всего изделия. Поэтому именно ему будет уделено наибольшее внимание в данной работе.

## 2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

Опорный СВЧ-генератор с ФАПЧ размещён в металлическом корпусе без внутренних перегородок. Подача внешней частоты от опорного кварцевого генератора и снятие выходного СВЧ-сигнала осуществляются через коаксиальные СВЧ-вводы, питание изделия производится через коаксиальные фильтры питания. Корпус и крышка изделия изготовлены из сплава АМГ с последующим гальваническим покрытием составом палладий–никель. Герметизация генератора осуществляется методом «перевернутой крышки», с использованием припоя ПОИн-50. Генератор имеет габаритные размеры  $63 \times 38 \times 12,5$  мм и массу 50 г.

Внешний вид изделия представлен на рис. 1.

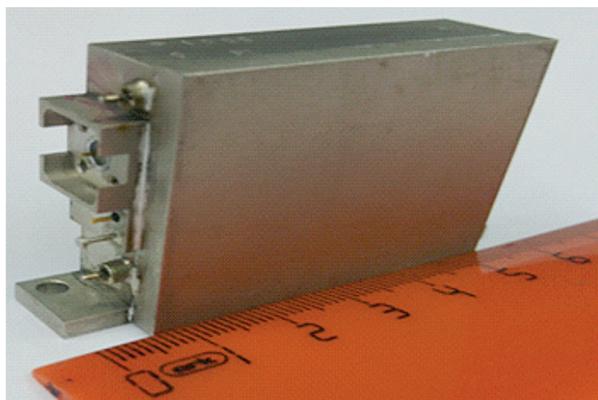


Рис. 1. Внешний вид генератора

Вся схемотехника и топология опорного СВЧ-генератора реализована на единой многослойной печатной плате (МПП), проводники которой соединены с вводами/выводами корпуса при помощи перемычек.

В каждом конкретном случае выбор материала подложки МПП основывается на компромиссном решении. Исходя из технологических преимуществ, а именно высокой повторяемости электрических параметров и удобства монтажа, рассматривались два типа материалов для платы генератора, это FR-4 и Ro4003. Однако, учитывая назначение изделия, в первую очередь как СВЧ-генератора, был выбран материал Ro4003, обладающий меньшим значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  ( $\epsilon = 3,38$ ;  $\text{tg}\delta = 0,002$ ) по отношению к FR-4 ( $\epsilon = 4,25$ ;  $\text{tg}\delta = 0,014$ ). Использование платы из Ro4003 позволяет реализовать более высокую добротность колебательного контура генератора, мень-

шие значения паразитных емкостей и индуктивностей топологии, обеспечивая возможность получения более низких уровней мощности фазовых шумов генератора и расширение верхнего предела рабочего диапазона частот реализуемой схемы.

Все навесные сосредоточенные компоненты схемы установлены в верхнем слое МПП и электрически соединены с топологическим рисунком платы методом пайки. На рис. 2 приведена МПП с установленными на ней навесными сосредоточенными элементами схемы.

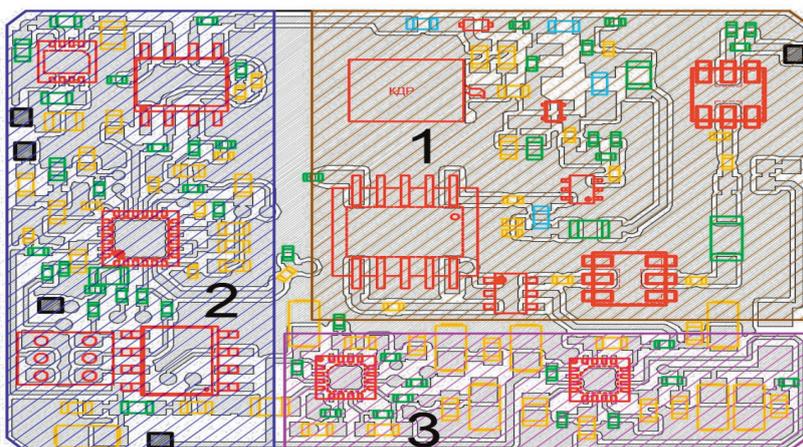


Рис. 2. МПП с установленными навесными компонентами

Для наглядности МПП условно разделена на три области. Цифрой один обозначена область формирования СВЧ-сигнала. В этой области расположен сам СВЧ-генератор (ГУН), цепи усиления, а также цепи деления мощности и частоты СВЧ-сигнала. Сигнал с выхода ГУН делится пассивным делителем мощности (ответвителем) с переходным ослаблением 20 дБ на два канала, основная часть СВЧ-сигнала поступает в выходную цепь изделия, включающую в себя фильтры низких частот, делитель частоты на два и СВЧ-усилитель. Ответвлённая часть сигнала с СВЧ-генератора поступает на микросхему СЧ для организации петли ФАПЧ.

Цифрой два обозначена область стабилизации частоты. Эта часть топологии включает в себя микросхему широкополосного синтезатора частот, активный пропорционально интегрирующий фильтр на операционном усилителе (ОУ), обеспечивающий широкий диапазон управляющих напряжений для ГУН, а также процессор, обеспечивающий загрузку в микросхему СЧ необходимых для его работы значений параметров.

Цифрой три обозначена область вторичных источников питания изделия. Здесь расположены малошумящие источники питания с высокой степенью интеграции.

Для обеспечения малой геометрической и электрической длины соединительных проводников, а значит, малых паразитных индуктивностей и емкостей топологии схемы все навесные компоненты схемы имеют исполнение для поверхностного монтажа и расположены в одной плоскости. Коаксиальный диэлектрический резонатор (КДР) установлен непосредственно на металлизированную площадку топологического рисунка верхнего слоя МПП, имеющую надёжное соединение с экранным, нижним, слоем платы через группу металлизированных отверстий. Центральный проводник КДР при помощи перемычки соединён с входом генератора, его активной частью. Часть топологии схемы опорного генератора, размещённая во втором сигнальном слое печатной платы, предназначена для коммутации низкочастотных цепей питания

и дополнительного взаимного экранирования. Четвёртый (нижний) слой МПП является полностью металлизированным и обеспечивает заземление платы после её пайки в корпус.

Толщина медной металлизации каждого слоя платы составляет 18 мкм. Финишное покрытие внешних слоёв топологии платы – иммерсионное золото. Сигнальные слои платы отделены друг от друга диэлектриком из Ro4003. Общая толщина изготавливаемой платы составляет 1 мм. МПП имеет сквозные металлизированные отверстия, необходимые для взаимной коммутации элементов топологических рисунков платы, расположенных в различных слоях МПП. Разрез МПП представлен на рис. 3.

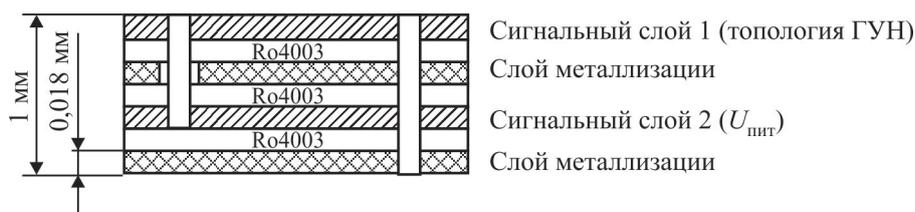


Рис. 3. Разрез МПП

Такая конструкция платы позволяет минимизировать взаимное влияние отдельных участков схемы друг на друга, обеспечивая улучшение показателя фазового шума изделия и упрощая конструкцию корпуса.

Часть МПП ГИС, занятая ГУН, представлена на рис. 4.

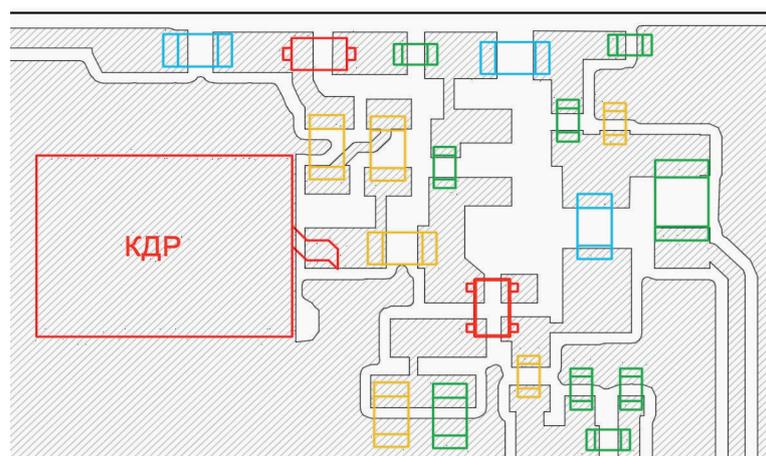


Рис. 4. Топология ГУН

Схема ГУН полностью выполнена на элементах с сосредоточенными параметрами. Наиболее подходящим вариантом оказалась традиционная схема Колпица (с общим эмиттером), достоинства которой являются простота реализации и высокая повторяемость параметров. При выборе как активных, так и пассивных компонентов схемы особое внимание уделялось их соответствию для применения в схемах с предельно низким уровнем фазовых шумов.

Так, в качестве активных элементов непосредственно для самого СВЧ-генератора были выбраны биполярный транзистор ВFP420F, имеющий сравнительно небольшой коэффициент шума (1...1,15 дБ), высокий коэффициент усиления на рабочей частоте (20 дБ), а также максимальную граничную частоту 25 ГГц, и варакторный диод ВВУ55 с низким значением  $R_s$  (0,2 Ом), достаточно высоким значением пробивного напряжения (16 В) и подходящим диапазоном изме-

нения ёмкостей (от 6 до 19 пФ). Оба элемента имеют малый размер корпуса. Исходя из жестких требований к уровню фазовых шумов ГУН и высокой частоте генерации для ГУН на КДР, основными направлениями разработки являлись оптимизация схемы генератора и, особенно, его топологии.

Добротность КДР на уровне 500 при типовой перестройке частоты не более 0,5 % позволяет получить достаточно низкий уровень фазовых шумов. Однако с ростом частоты геометрические размеры резонатора непропорционально уменьшаются, а вместе с ними значительно уменьшается и его добротность. Такое уменьшение геометрии резонатора обусловлено возрастающим влиянием паразитных параметров топологии платы, которое на частотах 3 ГГц и выше становится существенным. Принимая во внимание, что применённые активные компоненты имеют хороший запас значений параметров для реализации поставленных целей, КДР, нагруженный схемой генератора, становится наиболее критичным элементом с точки зрения обеспечения фазовых шумов и перестроечных характеристик ГУН. Также важнейшей характеристикой резонатора при создании генераторов такого типа является его ТКЧ. Возможность приобретения КДР с заданной характеристикой ТКЧ во многом определяет возможность сужения диапазона электрической перестройки ГУН и, следовательно, снижения его СПМФШ. В то же время генераторы на КДР обладают достаточной технологичностью, и при определённых условиях их сборка может полностью выполняться в автоматическом режиме.

### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Современные способы изготовления печатных плат предоставляют большой выбор технологических и технических решений для воплощения замыслов конструкторов СВЧ-техники. Это и возможность изготовления плат с количеством слоёв от 1 до 48, и возможность компоновки в пределах одной платы слоёв из разных типов материалов, и точность выполнения ширины проводников и зазоров между ними до 0,1 мм, и возможность точного сверления практически любого числа отверстий минимальным диаметром до 0,2 мм с последующей их металлизацией, позволяющие формировать диэлектрические волноводы и экранированные теплоотводящие полигоны фактически любой формы. Однако существует и ряд проблем, связанных с установкой уже собранных плат в корпус изделия. Известно, что крепление плат в корпус при помощи винтов не позволяет гарантировать параметры изделия при его эксплуатации в широком диапазоне температур, жестких требований по виброустойчивости, а также не позволяет обеспечить требуемую долговечность изделия. При пайке уже собранной платы в корпус наличие сквозных, незакрытых металлизированных отверстий на теплоотводящих заземляющих полигонах приводит к смешиванию низкотемпературного припоя, используемого для пайки, с высокотемпературной пастой, применяемой при монтаже навесных компонентов платы. Низкотемпературный припой просто поднимается по стенкам металлизированных отверстий из нижнего слоя в верхний. В результате происходит образование неизвестного припоя с непонятной температурой плавления. В конечном счёте это приводит к так называемому всплытию микросхем и появлению коротких замыканий под ними. Существует несколько способов решения проблемы. Это защита сквозных отверстий эпоксидной пастой, выполнение глухих отверстий в промежуточных слоях платы, заполнение отверстий теплопроводящим клеем или закрытие теплоотводящих отверстий с экранной, паяемой, стороны платы заплатками из фольги методом её приварки.

Во всех случаях остаётся вопрос о качестве получающегося при этом теплоотвода, что особенно критично для малощумящих микросхем СВЧ-диапазона, имеющих обычно высокое потребление. Следует отметить, что отвод тепла от микросхем через металлизированные отверстия без заполнения их материалом с высокой теплопроводностью является недостаточно эффективным из-за высокого теплового сопротивления тонкого слоя металлизации стенок отверстий. Наиболее приемлемыми способами являются закрытие теплоотводящих отверстий с экранной стороны платы заплатками из фольги с последующим заполнением теплоотводящих, заземляющих отверстий под микросхемой пастой при монтаже микросхемы на плату или заполнение отверстий теплопроводящим клеем непосредственно перед пайкой собранной платы в корпус (рис. 5).

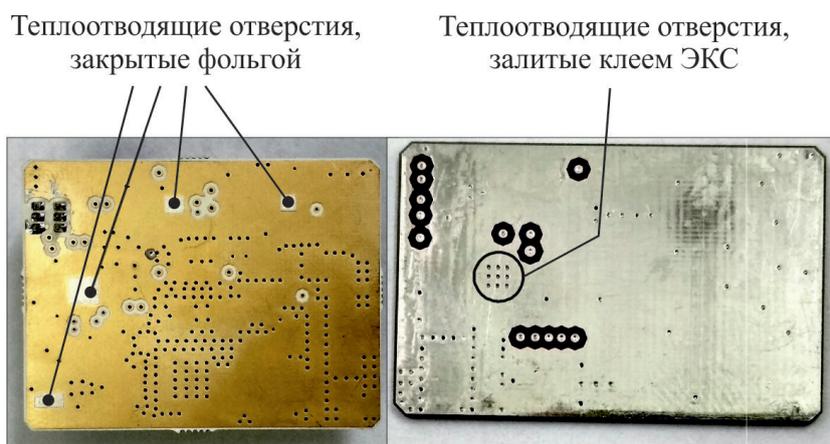


Рис. 5. Теплоотводящие отверстия

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной части работы были проведены исследования влияния материала платы на характеристику СПМФШ ГУН на КДР с рабочей частотой 3600 МГц и диапазоном перестройки частоты не менее 8 МГц.

На рис. 6 представлены результаты измерений СПМФШ для вариантов генератора, выполненных на платах из материала FR-4 и Ro4003. Поскольку в выходной цепи обоих генераторов использованы делители частоты на 2, приведённый на рис. 6 спектр сигнала имеет несущую частоту  $3600/2 = 1800$  МГц, что не мешает увидеть выигрыш по показателю СПМФШ на 4 дБ у ГУН на плате из Ro4003 по сравнению с ГУН на плате из FR-4. Очевидно, что соответствующие спектры сигналов ГУН с частотой 3600 МГц будут иметь показатели СПМФШ на 6 дБ хуже с сохранением полученного преимущества у генератора на Ro4003.

В целях анализа поведения исследуемого ГУН на КДР при его работе в составе петли ФАПЧ были проведены предварительные расчёты параметров петли при помощи программы ADIsimPLL и произведены натурные измерения реального образца изделия. Для синхронизации частоты ГУН с частотой опорного кварцевого генератора использовалась петля ФАПЧ на микросхеме синтезатора частоты НМС704, работающая в режиме с целочисленным коэффициентом деления. Для достижения максимально низкого уровня СПМФШ ЧФД микросхемы работал на максимально возможной, в данном случае, частоте сравнения 100 МГц, равной частоте опорного кварцевого генератора. В качестве эталонного был применён термокомпенсирован-

ный кварцевый генератор с уровнем фазовых шумов  $-155$  дБ/Гц при отстройке  $1$  кГц. Ширина полученной петли ФАПЧ составила  $100$  кГц.

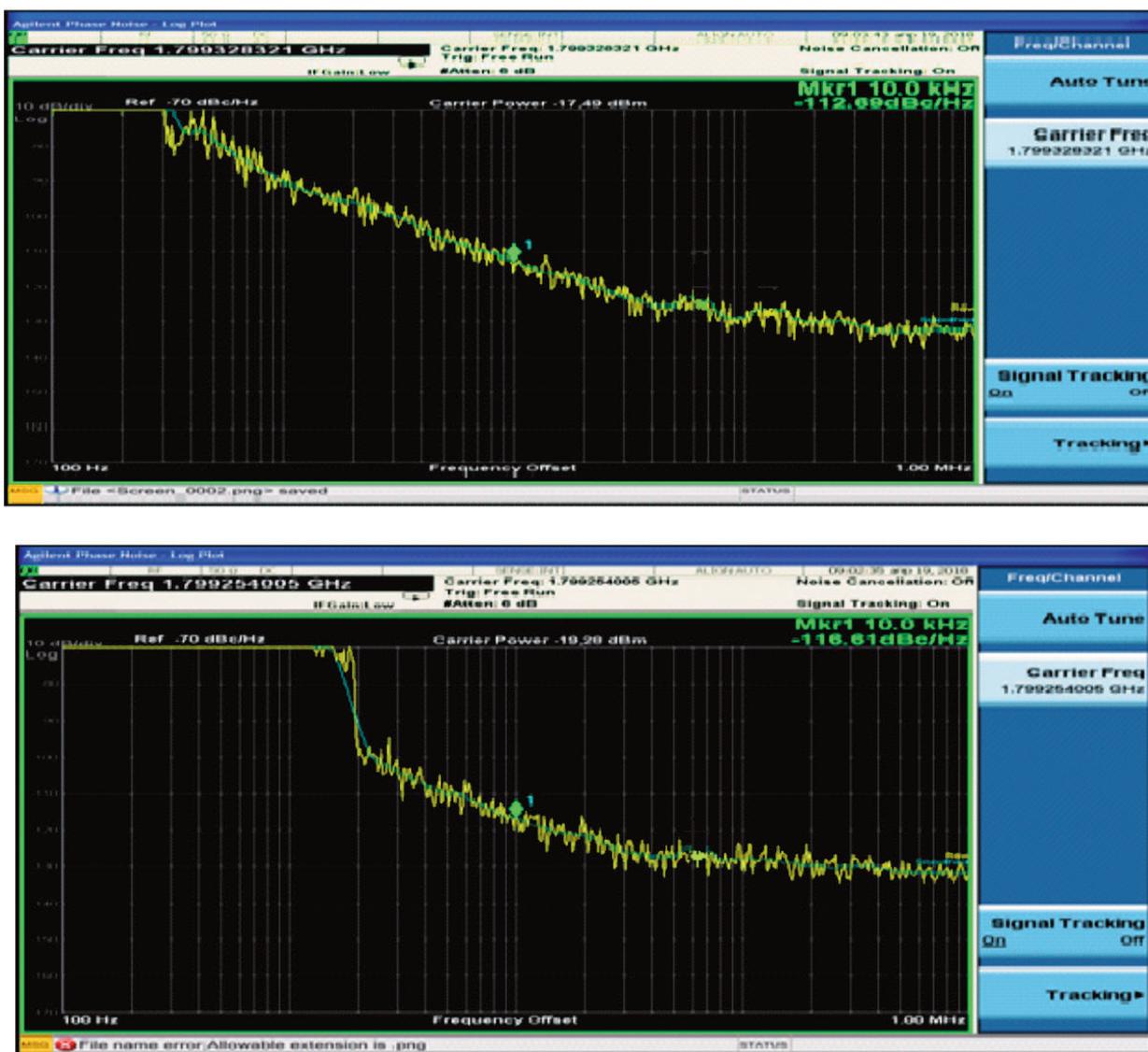


Рис. 6. Значение СПМФШ поделённой на 2 частоты при отстройке от несущей до  $1$  МГц. На верхнем графике показана характеристика для подложки из FR-4; на нижнем графике – для подложки из Rо4003

На рис. 7 представлены график расчёта СПМФШ для генератора, охваченного петлёй ФАПЧ, проведённого при помощи программы ADIsimPLL. Расчёт проводился для случая с делителем частоты на 2 в выходной цепи генератора. Этот делитель не является частью цепи обратной связи петли ФАПЧ. На рис. 8 представлен результат измерения реального образца изделия, охваченного рассчитанной петлёй ФАПЧ, с аналогичным включением делителя частоты на 2 в выходной цепи.

Исходя из полученных результатов, видно, что значение СПМФШ реального образца модуля опорного СВЧ-генератора на КДР, охваченного петлёй ФАПЧ, находится вблизи рассчитан-

ного значения СПМФШ, ограниченного шумами компонентов схемы ФАПЧ и опорного КГ, что косвенно подтверждает оптимальность выбора номиналов схемы ГУН.

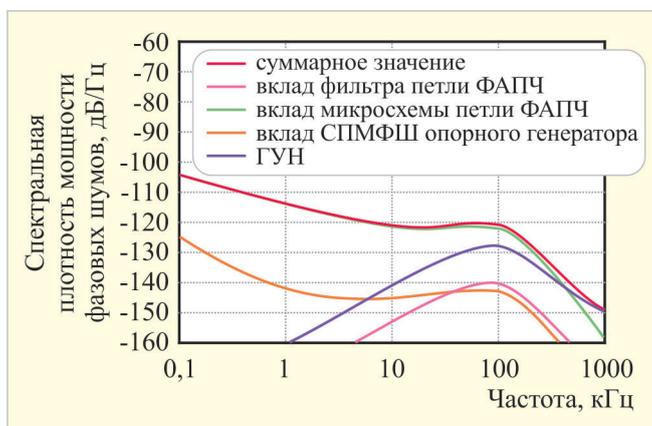


Рис. 7. Рассчитанная в программе ADIsimPLL зависимость СПМФШ при отстройке до 1 МГц генератора, стабилизированного кольцом ФАПЧ с делением частоты на 2

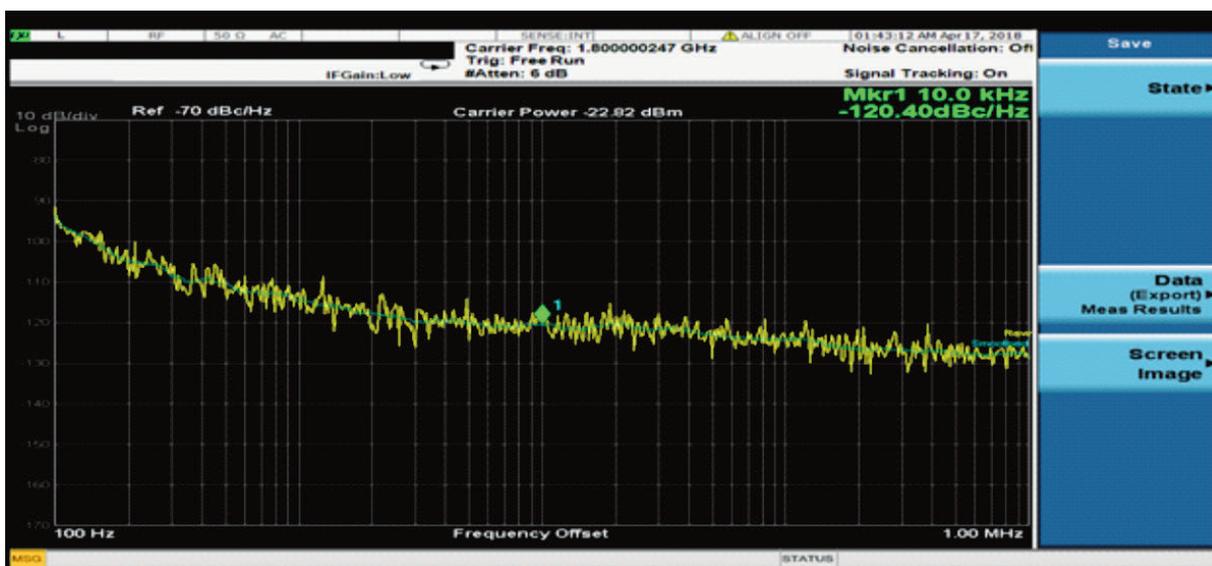


Рис. 8. Полученная зависимость СПМФШ при отстройке до 1 МГц генератора, стабилизированного кольцом ФАПЧ с делением частоты на 2

## 5. ВЫВОДЫ

Разработан высокостабильный малогабаритный опорный СВЧ-генератор с рабочей частотой 3,6 ГГц на коаксиальном диэлектрическом резонаторе, стабилизированный петлей ФАПЧ. Опорный генератор обладает низким уровнем фазовых шумов (-112 дБ/Гц) при отстройке на 2 кГц, уровнем ПСС не более -70 дБ и выходной мощностью 0...40 мВт. Опорный генератор является законченным изделием и предназначен для применения в аппаратуре специального назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Rubiola, E.** The leeson effect: phase noise in feedback oscillators / E. Rubiola // 2006 IEEE International Frequency Control Symposium Tutorial, June 2006.
2. **Rohde, U.** The design of modern microwave oscillators for wireless applications: theory and optimization / U. Rohde, A. Poddar and G. Bock. – John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, 2005.
3. **Ченакин, А.** Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблемы / А. Ченакин // Электроника: НТБ. – 2011. – № 4.
4. [www.analog.com](http://www.analog.com)
5. [www.hittite.com](http://www.hittite.com)
6. **Beltchicov, S.** A low phase noise octave-band synthesizer using an X-band frequency reference / S. Beltchicov, A. Dzisiak, I. Guletskiy // Microwave Journal. – May, 2014.
7. **Chenakin, A.** Frequency synthesizers: concept to product / A. Chenakin. – Artech House. Norwood. MA. – 2011.

Статья поступила 28 февраля 2019 г.

#### НОВЫЕ КНИГИ

**ИОВДАЛЬСКИЙ В. А. Внутрисхемные соединения ГИС СВЧ-диапазона: учеб. пособие** / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, И. А. Соколов; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2019. – 128 с. + цв. вкл.

Учебное пособие посвящено вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ-диапазона. Проведен анализ влияния геометрии внутрисхемных соединений на электрические характеристики схемы. Проведена оптимизация геометрии внутрисхемных соединений. Представлены результаты исследования возможности улучшения электрических характеристик различных устройств путем оптимизации геометрии внутрисхемных соединений. Сформированы соответствующие направление и концепция совершенствования ГИС СВЧ.

Пособие предназначено для студентов Российского технологического университета (МИРЭА) очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр» и «магистр», обучающихся по направлениям 2.11.03.03, 2.11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 2.11.03.04, 2.11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»; дисциплины: «Технология производства электронных средств», «Элементная база радиоэлектронных средств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Технология электронной компонентной базы», аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.

# РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.318.51, 621.3.049.7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ЕМКОСТНОГО ТИПА ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЙ

И. Е. Лысенко, А. В. Ткаченко

*Южный Федеральный Университет, Институт нанотехнологий, электроники  
и приборостроения, г. Таганрог*

Статья посвящена моделированию и расчету основных высокочастотных параметров разработанной конструкции интегрального микроэлектромеханического переключателя с емкостным принципом коммутации в конфигурации с копланарной линией передачи, который может быть использован как основной элемент для перенаправления сигналов в однополюсных переключателях на одно и более направлений, в цепях согласования сопротивления, в фазовращателях, делителях мощности.

*КС: радиочастотные (РЧ) микроэлектромеханические системы (МЭМС); переключатель; копланарная линия передачи (КЛП); потери на отражение; вносимые потери; изоляция*

## SIMULATION OF THE DESIGN OF INTEGRATED MEMS CAPACITIVE SWITCH FOR MICROWAVE APPLICATIONS

I. E. Lysenko, A. V. Tkachenko

*Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics  
and Electronic Equipment Engineering, Taganrog*

This article is devoted to modeling and calculation of high-frequency parameters of the developed design of integrated microelectromechanical switch with capacitive switching principle in the configuration with coplanar transmission line, which can be used as the main element for redirecting signals in single-pole switches to one or more directions, in resistance matching circuits, phase shifters, power divider attenuators.

*Keywords: radio frequency (RF) microelectromechanical systems (MEMS); switch; coplanar transmission line (CTL); reflection loss; insertion loss; isolation*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиочастотные (РЧ) микроэлектромеханические системы (МЭМС) – это интенсивно развивающийся и растущий сегмент современных коммуникационных технологий как наземного, так и космического базирования. РЧ МЭМС-сегмент образовался из огромного на сегодняшний день рынка МЭМС, который включает такие миниатюризированные приборы и устройства, как акселерометры, гироскопы, микрофоны, подвижные микрозеркала, микрофлюидные устройства, датчики температуры и давления и т. д., которые находят свое применение, например,

в автомобилях (для раскрытия воздушных подушек безопасности) или же в мобильных устройствах связи (гироскопы для вращения дисплея).

Использование МЭМС для коммутации РЧ-сигналов впервые было продемонстрировано в 1971 году с помощью консольных переключателей, изготовленных с использованием технологии объемной микрообработки [1]. С тех пор началось развитие кантилеверных [2, 3] и роторных [4] МЭМС-переключателей для работы на высоких и сверхвысоких частотах. Переключатели с этим типом исполнительного механизма обеспечивают омическую связь между микроконтактами РЧ-линии передачи. Дальнейшие исследования привели к разработкам РЧ МЭМС-переключателей, в которых в качестве исполнительного механизма выступает металлическая мембрана с емкостной связью в конфигурации с копланарной линией передачи (КЛП), расположенной на поверхности диэлектрической подложки [5, 6]. РЧ МЭМС-переключатели с емкостной связью демонстрируют малые вносимые потери, низкие управляющие напряжения, высокую скорость коммутации и высокую линейность [7–10]. Данный класс переключателей представляет собой потенциал для проектирования маломощных высокопроизводительных микроволновых цепей с высокой линейностью, работающих на частотах до 100 ГГц с потерями на отражение во включенном состоянии около  $-0,5$  дБ и изоляцией во включенном состоянии более  $-20$  дБ, например, для фазовращателей фазированных антенных решеток [11] или реконфигурируемых схем управления сопротивлением [12].

В настоящее время развитие 5G-поколения мобильной связи является областью конвергенции для разнообразных потребностей и сложных технических требований, что не характерно для научно-исследовательского и промышленного сообщества. В связи с массовым распространением мобильных устройств связи около двух десятилетий назад, тенденция к интеграции беспроводных услуг в одном устройстве неизбежна. В связи с этим предполагается, что 5G-поколение мобильной связи противопоставит в 1000 раз больше мощности в сравнении с текущими мобильными сетями [13]. Широкополосные беспроводные приложения, такие, как потоковое видео высокого разрешения и тактильный интернет [14], требуют скорости передачи данных, которые могут быть в 10...100 раз больше по сравнению с сетями 4G, работающими сегодня [15].

При наличии такого рода предпосылок, очевидно, что не найдется уникальной технологии, способной удовлетворить все сложные технических требования приложений 5G-поколения мобильной связи. Потребуется крупномасштабные многоходовые устройства и использование миллиметрового спектра волн для обеспечения гигабайтной скорости связи. Кроме того, предполагается, что протоколы связи 5G потребуют более высоких рабочих частот (например, значительно выше 6 ГГц) и большой перенастройки для покрытия различных услуг, уменьшая аппаратное резервирование и потребление энергии.

Для решения этих задач необходимо использовать пассивные компоненты с повышенными функциональными характеристиками, и в связи с этим РЧ МЭМС обозначены как один из главных кандидатов как для мобильных устройств связи, так и для базовых станций радиосвязи [16].

С другой стороны, независимо от применяемой технологии РЧ-компоненты всегда должны иметь герметизацию и быть интегрированы в более сложные подсистемы и системы. По сути, рост использования РЧ-систем для мобильных устройств связи происходит с интеграции разнородных технологий с изготовлением РЧ-блоков в одном технологическом процессе с подсистемами управления, что приводит к миниатюризации и низкой стоимости устройства.

Таким образом, данная статья посвящена разработке и моделированию основных высокочастотных параметров конструкции интегрального МЭМС-переключателя с емкостным прин-

ципом коммутации в конфигурации с копланарной линией передачи, который может быть использован в качестве пассивного элемента в устройствах наземной и спутниковой радиосвязи (X-диапазон частот). Отличительной особенностью разработанной конструкции интегрального МЭМС-переключателя является повышение электромагнитных и механических характеристик совместно с низким напряжением притяжения и использованием алюминия в качестве основного структурного материала.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

В разработанной конструкции, изображенной на рис. 1, представлен интегральный электростатический МЭМС-переключатель с емкостным принципом коммутации контакта металл-диэлектрик-металл.

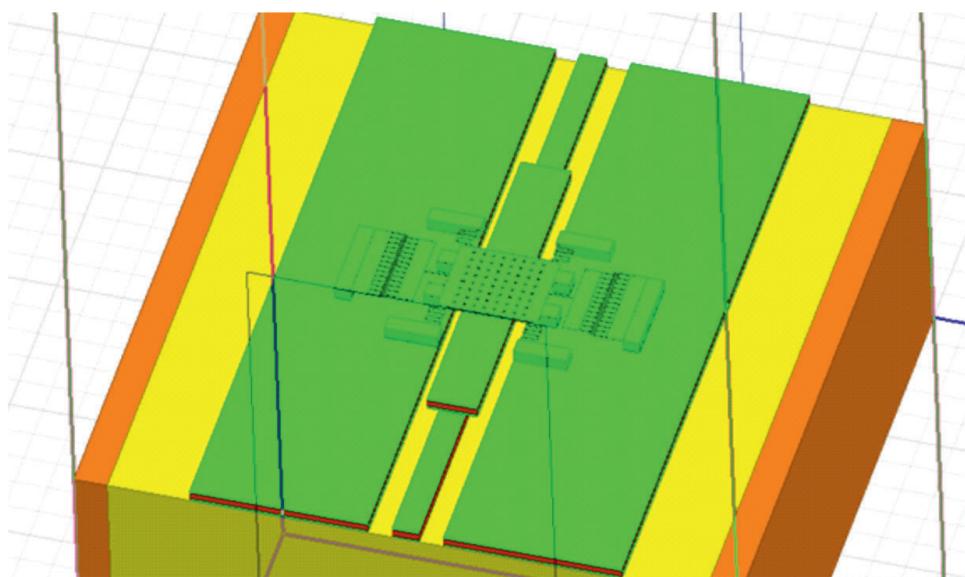


Рис. 1. Модель разработанного интегрального МЭМС-переключателя в ANSYS HFSS

В качестве исполнительного механизма в интегральном МЭМС-переключателе используется подвижная перфорированная металлическая мембрана, представляющая собой трехслойную структуру. Мембрана закреплена с зазором относительно сигнальной КЛП и неподвижного верхнего электрода на четырех опорных элементах, расположенных на заземляющих КЛП, с помощью упругих элементов подвеса, выполненных в форме меандра. Таким образом, сигнальная КЛП образует с заземленной мембраной конденсатор переменной емкости и отделена от нее тонким диэлектрическим слоем. В исходном положении мембраны (при отсутствии управляющего напряжения) емкость переменного конденсатора невелика и РЧ-сигнал беспрепятственно поступает на выход сигнальной КЛП. В случае, когда мембрана находится в нижнем положении (при подаче управляющего напряжения между мембраной и неподвижным нижним электродом), поступающий на вход сигнальной КЛП РЧ-сигнал шунтируется на линию заземления КЛП из-за возникшей высокой параллельной емкости. Принцип работы интегрального МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации изображен на рис. 2.

В качестве материала элементов конструкции интегрального МЭМС-переключателя, а также сигнальной и заземляющих КЛП используется TiN/Al/TiN; для диэлектрических слоев ис-

пользуется  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; подложкой является толстый слой  $\text{SiO}_2$ , осажденный в вытравленной траншее стандартной кремниевой подложки с низким удельным сопротивлением (1...20 Ом·см).

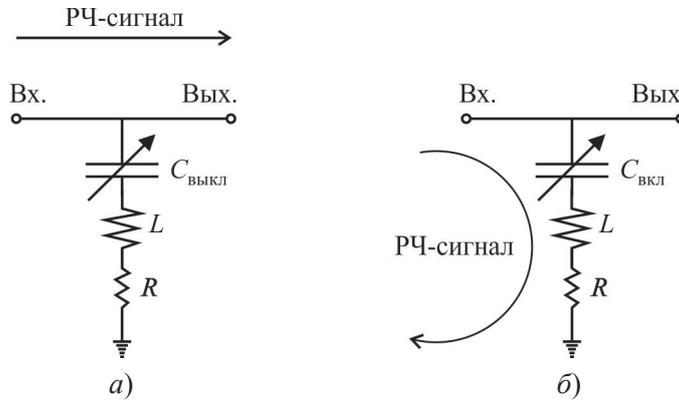


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема интегрального МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации:  
 а – переключатель выключен; б – переключатель включен

Топологические размеры МЭМС-переключателя представлены в таблице.

| Элемент конструкции               | Размеры, мкм  |
|-----------------------------------|---------------|
| Мембрана                          | 250×250×2     |
| Отверстие в мембране              | 10×10×2       |
| Неподвижный нижний электрод       | 1000×150×35   |
| Неподвижный верхний электрод      | 400×260×2     |
| Подвижные гребенчатые структуры   | 245×100×2     |
| Неподвижные гребенчатые электроды | 265×100×2     |
| Опоры                             | 160×50×39     |
| Упругие элементы подвеса          | 50×20×2       |
| Диэлектрический слой              | 250×150×0,15  |
| Подложка (слой $\text{SiO}_2$ )   | 1800×2000×500 |

В разработанной конструкции интегрального МЭМС-переключателя для передачи РЧ-сигнала используется КЛП, как показано на рис. 3, что позволяет обойтись без применения земляной шины на обратной стороне подложки и упрощает технологический процесс изготовления. Кроме того, КЛП, в отличие от микрополосковой линии передачи (МЛП), обладает высокой прочностью конструкции, характеризуется меньшим сопротивлением сигнальной линии, а также обеспечивает процесс естественного отвода тепла, что позволяет избежать внешних радиаторов для активных устройств. Однако КЛП характеризуется большими потерями на отражение на высоких частотах и при высоких плотностях тока, чем МЛП.

Неподвижный верхний электрод интегрального МЭМС-переключателя предназначен для притяжения мембраны в верхнее положение и увеличения коэффициента емкости, что в свою очередь оказывает влияние на высокочастотные (ВЧ) параметры.

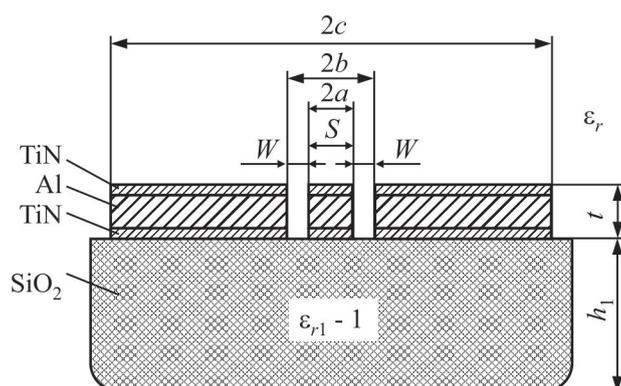


Рис. 3. Поперечное сечение подложки с КЛП, используемой в разработанной конструкции интегрального МЭМС-переключателя ( $a, b, c$  – геометрические параметры КЛП;  $S$  – ширина сигнальной КЛП;  $W$  – величина зазора между сигнальной и заземляющей КЛП;  $t$  – толщина проводников КЛП;  $h_1$  – толщина диэлектрического основания)

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

В общем случае МЭМС-переключатель представляет собой симметричный четырехполюсник, электрическая принципиальная схема которого показана на рис. 4.

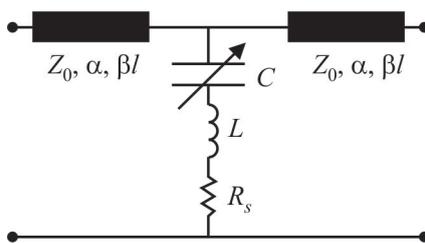


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема МЭМС-переключателя

Таким образом, помимо расчета волнового сопротивления КЛП  $Z_{CPW}$ , являющегося параметром согласования ВЧ-параметров, необходимо также определить  $S$ -параметры:  $S_{11}^{off}$  – уровень потерь на отражение в выключенном состоянии (в исходном положении мембраны при отсутствии управляющего напряжения либо при подаче управляющего напряжения на неподвижный верхний электрод, что соответствует верхнему положению мембраны);  $S_{21}^{off}$  – вносимые потери в выключенном состоянии (исходное или верхнее положение мембраны);  $S_{21}^{on}$  – величина изоляции во включенном состоянии (при нижнем положении мембраны).

Расчет волнового сопротивления КЛП осуществляется при помощи метода конформных преобразований и частичных емкостей [17]. Предполагается, что в такой структуре распространяется квазистатическая ТЕМ-волна, отличающаяся от ТЕМ-волны тем, что поперечные компоненты электромагнитного поля в ней существенно больше, чем продольные (в ТЕМ-волне продольные компоненты отсутствуют). Кроме того, в данном случае рассматривается КЛП с плоскостями заземления конечной ширины, подложкой конечной толщины и проводниками конечной толщины [18].

Используя это приближение, фазовая скорость  $v_{ph}$ , эффективная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{eff}$  и волновое сопротивление  $Z_{CPW}$  определяются уравнениями (1)...(3) [19]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0}, \quad (1)$$

$$v_{ph} = \frac{c'}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (2)$$

$$Z_{CPW} = \frac{1}{Cv_{ph}}, \quad (3)$$

где  $c'$  – скорость света в свободном пространстве;  $C$  – емкость на единицу длины линии;  $C_0$  – емкость на единицу длина линии при отсутствии диэлектрической подложки.

Для определения этих емкостей предполагается, что границы слоев диэлектрика проходят вдоль линий электрического поля. В этом случае магнитные стенки можно разместить вдоль электрических границ, не нарушая полей, а емкость КЛП разделить на парциальные емкости [19]. В этом предположении емкость КЛП, показанная на рис. 3, может быть записана как суперпозиция двух частичных емкостей с помощью уравнения (4) [20]:

$$C = C_0 + C_1. \quad (4)$$

Емкость  $C_0$  при отсутствии диэлектрической подложки определяется уравнением (5) [19]:

$$C_0 = 4\epsilon_0(K(k')/K(k)), \quad (5)$$

где  $\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $K$  – полный эллиптический интеграл первого рода; аргументы  $k$  и  $k'$  зависят от геометрии КЛП и задаются уравнениями (6) и (7):

$$k = \frac{c}{b} \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2}}, \quad (6)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2}}. \quad (7)$$

Для определения емкости  $C_1$  предполагается в соответствии с рис. 3, что электрическое поле существует только в диэлектрическом слое толщиной  $h_1$  с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r1} - 1$ . В таком случае емкость  $C_1$  определяется уравнением (8) [19]:

$$C_1 = 2\epsilon_0(\epsilon_{r1} - 1) \frac{K(k'_1)}{K(k_1)}, \quad (8)$$

где

$$k_1 = \frac{\sin h(\pi c / 2ch_1)}{\sin h(\pi b / 2h_1)} \sqrt{\frac{\sin h^2(\pi b / 2h_1) - \sin h^2(\pi a / 2h_1)}{\sin h^2(\pi c / 2h_1) - \sin h^2(\pi a / 2h_1)}}, \quad (9)$$

$$k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2} = \frac{\sin h(\pi a / 2h_1)}{\sin h(\pi b / 2h_1)} \sqrt{\frac{\sin h^2(\pi c / 2h_1) - \sin h^2(\pi b / 2h_1)}{\sin h^2(\pi c / 2h_1) - \sin h^2(\pi a / 2h_1)}}. \quad (10)$$

В итоге эффективная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_{eff}$  и волновое сопротивление  $Z_{CPW}$  КЛП определяются с помощью уравнений (11) и (12):

$$\varepsilon_{eff} = \frac{c}{c_0} = 1 + \frac{1}{2}(\varepsilon_{r1} - 1) \frac{K(k)K(k_1')}{K(k')K(k_1)}, \quad (11)$$

$$Z_{CPW} = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{K(k)}{K(k')}. \quad (12)$$

В методе конформного отображения [21] общее затухание в КЛП определяется суперпозицией двух факторов: затуханием, обусловленным потерями в диэлектрической подложке, и затуханием в проводниках (сигнальная и заземляющие КЛП). Затухание, соответствующее диэлектрическим потерям, определяется уравнением (13):

$$\alpha_d = \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{\varepsilon_r}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} q \operatorname{tg} \delta_e, \quad (13)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость подложки;  $\operatorname{tg} \delta_e$  – тангенс диэлектрических потерь;  $\varepsilon_{eff}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость;  $q$  – фактор заполнения, определяемый уравнением (14):

$$q = \frac{1}{2} \frac{K(k_1) K(k_0')}{K(k_1') K(k_0)}. \quad (14)$$

Члены  $K(k_1)$  и  $K(k_0)$  являются полными эллиптическими интегралами первого вида с модулями  $k_1$  и  $k_0$ , которые определяются уравнениями (15), (16):

$$k_1 = \frac{\sin h(\pi S / 4h_1)}{\sin h[\pi(S + 2W) / 4h_1]}, \quad (15)$$

$$k_0 = \frac{S}{S + 2W}. \quad (16)$$

Члены  $k_1'$  и  $k_0'$  являются дополнительными и определяются уравнениями (17), (18):

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}, \quad (17)$$

$$k_0' = \sqrt{1 - k_0^2}. \quad (18)$$

Для различных диэлектрических материалов тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta_e$  остается величиной постоянной при росте частоты, однако затухание, соответствующее диэлектрическим потерям  $\alpha_d$ , линейно возрастает с ростом частоты.

Затухание в проводниках определяется с помощью уравнения (19) [21]:

$$\alpha_c = \frac{R_c + R_g}{2Z_0}, \quad (19)$$

где  $R_c$  – последовательное сопротивление на единицу длины сигнальной линии, а  $R_g$  – распре-

деленное последовательное сопротивление на единицу длины линий заземления, определяемые соответственно уравнениями (20) и (21).

$$R_c = \frac{R_s}{4S(1-k_0^2)K^2(k_0)} \left[ \pi + \ln \left( \frac{4\pi S}{t} \right) - k_0 \ln \left( \frac{1+k_0}{1-ko} \right) \right], \quad (20)$$

$$R_g = \frac{k_0 R_s}{4S(1-k_0^2)K^2(k_0)} \left[ \pi + \ln \left( \frac{4\pi(S+2W)}{t} \right) - \frac{1}{k_0} \ln \left( \frac{1+k_0}{1-k_0} \right) \right]; \quad (21)$$

$Z_0$  – характеристическое сопротивление КЛП;  $R_s$  – сопротивление скин-слоя, определяемое уравнением (22):

$$R_s = \frac{1}{\delta \sigma}; \quad (22)$$

$\sigma$  – проводимость;  $\delta$  – толщина скин-слоя, определяемая уравнением (23):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}; \quad (23)$$

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $\mu = \mu_0 \mu_r$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость.

Таким образом, полное затухание в КЛП определяется уравнением (24):

$$\alpha = (\alpha_d + \alpha_c) = 20 \log_{10} e (\alpha_d + \alpha_c). \quad (24)$$

Уровень вносимых потерь в КЛП длиной  $l_{CPW}$  будет определяться уравнением (25):

$$S_{21}^{off} = 20 \log_{10} e (\alpha_d + \alpha_c) l_{CPW}. \quad (25)$$

Уровень потерь на отражение определяется уравнением (26):

$$S_{11}^{off} = 10 \log_{10} \left| 1 - (S_{21}^{off})^2 \right|. \quad (26)$$

Величина изоляции определяется уравнением (27) [7]:

$$S_{21}^{on} = 10 \log_{10} \left( 4\omega^2 Z_0^2 \frac{\left( \frac{C_d}{2} \right)^2}{\left( 1 + \frac{l_{CPW}}{2Z_{CPW} C_d v_{ph}} \right)^2} \right), \quad (27)$$

где  $C_d$  – емкость переменного конденсатора в нижнем положении мембраны, определяемая уравнением (28):

$$C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t_d}; \quad (28)$$

$\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрического слоя;  $A$  – площадь электростатического взаимодействия;  $t_d$  – толщина диэлектрического слоя переменного конденсатора.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования высокочастотных параметров интегрального МЭМС-переключателя представлены на рис. 5...10.

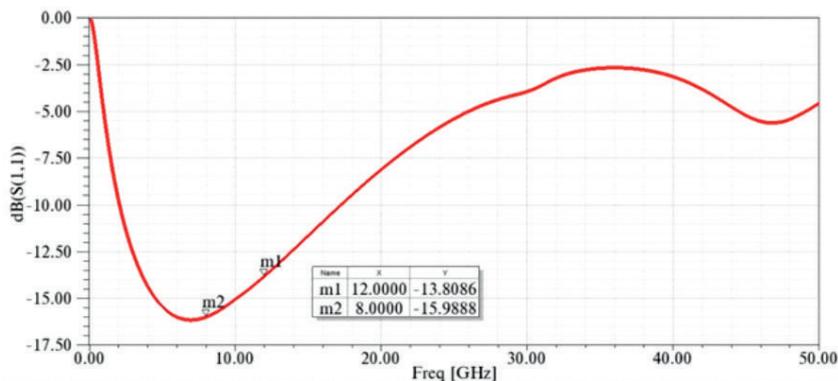


Рис. 5. Потери на отражение при исходном положении мембраны

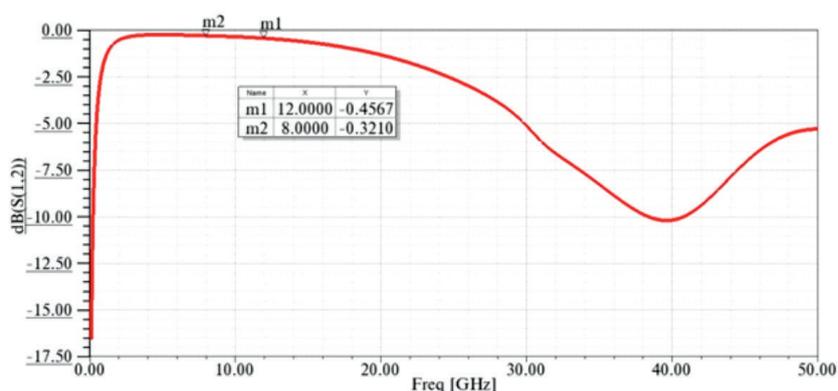


Рис. 6. Вносимые потери при исходном положении мембраны

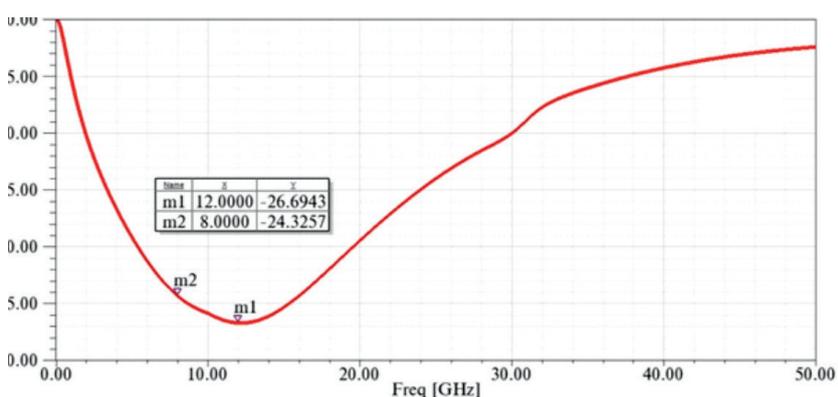


Рис. 7. Потери на отражение при поднятом положении мембраны

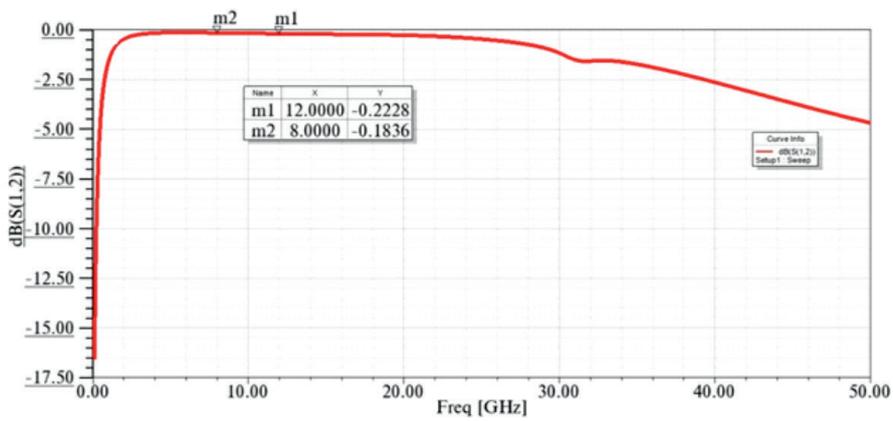


Рис. 8. Вносимые потери при поднятом положении мембраны

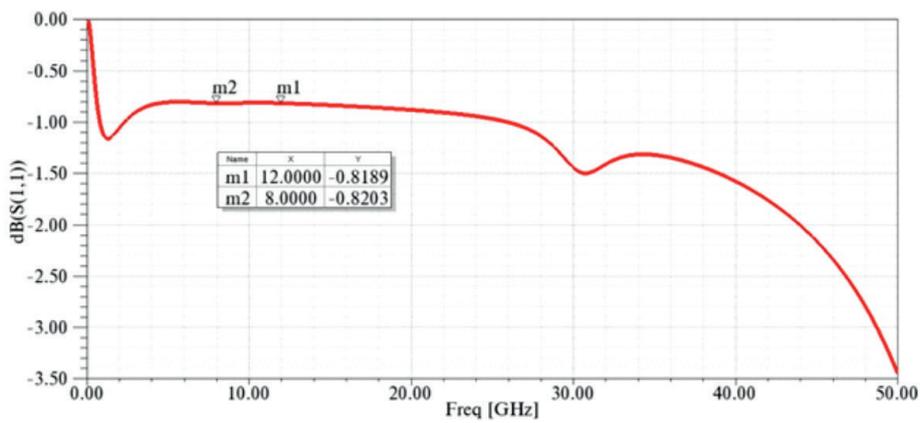


Рис. 9. Потери на отражение при нижнем положении мембраны

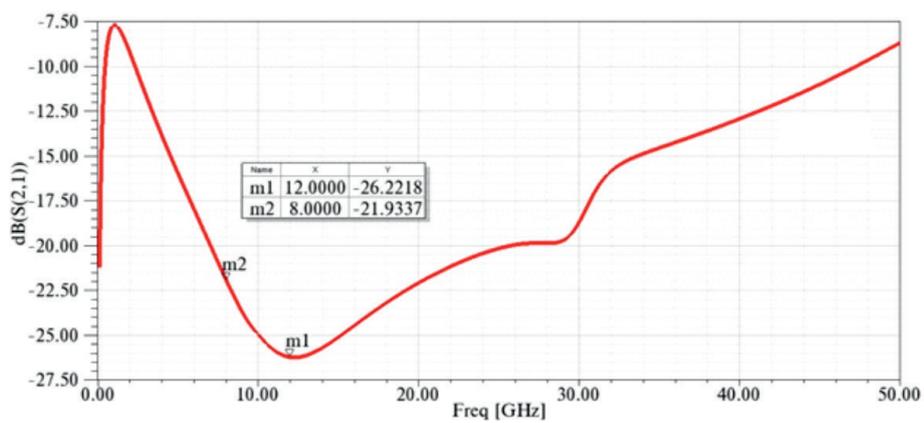


Рис. 10. Изоляция при нижнем положении мембраны

Величина потерь на отражение  $S_{11}^{off}$  в исходном положении мембраны, т. е. при отсутствии управляющего напряжения (см. рис. 5), и в верхнем положении, при приложении управляющего напряжения между мембраной и неподвижным верхним электродом (см. рис. 7), меньше -10 дБ, что соответствует отличному согласованию сигнальной КЛП по РЧ-входу и РЧ-выходу.  $S_{11}^{off}$  для  $X$ -диапазона частот (8...12 ГГц) лежит в следующих пределах: -16...-13,8 дБ для исходного положения мембраны, -24,3...-26,7 дБ для верхнего положения, что свидетельствует о том, что очень малый уровень мощности отражен. При этом уровень вносимых потерь  $S_{21}^{off}$  лежит в следующих пределах: -0,32...-0,45 дБ для исходного положения мембраны и -0,18...-0,22 для верхнего положения. В идеальных переключателях уровень потерь на отражение в выключенном состоянии должен быть не менее -10 дБ на требуемой рабочей частоте, однако если данное условие не выполняется, то это свидетельствует о том, что максимум мощности отражается от РЧ-входа и не передается по сигнальной КЛП через переключатель [22].

В нижнем положении мембраны при уменьшении величины воздушного зазора увеличивается емкость переменного конденсатора структуры металл-диэлектрик-металл. Данная величина емкости влияет на величину изоляции  $S_{21}^{on}$  ВЧ-сигнала во включенном состоянии переключателя. Для диапазона частот 8...12 ГГц величина изоляции лежит в пределах -21,93...-26,2 дБ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам проведенного моделирования основных ВЧ-параметров разработанной конструкции интегрального электростатического МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации в конфигурации с КЛП на подложке из оксида кремния, наименьшие вносимые потери и потери на отражение при разомкнутом состоянии переключателя составляют -24,3...-26,7 дБ и -0,32...-0,45 дБ соответственно, а наибольшая величина изоляции при замкнутом состоянии переключателя составляет -21,93...-26,2 дБ и находится в диапазоне частот 8...12 ГГц ( $X$ -диапазон), что соответствует рабочему частотному диапазону устройств наземной и спутниковой радиосвязи. Кроме того, представленный МЭМС-переключатель может быть реализован с использованием арсенидгаллиевой технологии изготовления интегральных схем (ИС), GaAs на сегодняшний день является основным используемым материалом для изготовления высокочастотных и сверхвысокочастотных ИС.

*Результаты исследования получены с использованием оборудования Студенческого конструкторского бюро «Элементы и приборы инерциальных навигационных систем робототехники» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного Федерального Университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке «Программы развития Южного Федерального Университета до 2021 года», проект ВнГр-07/2017-10.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Peterson, K. E.** Micromechanical membrane switches on silicon / K. E. Peterson // IBM J. Res. Develop. – July 1979. – Vol. 23, No 4. – P. 376 – 385.
2. **Zavracky, P. M.** Electrically actuated micromechanical switches with hysteresis / P. M. Zavracky, R. H. Morrison // Presented at the IEEE Solid State Sensor Conf. – 1984. – P. 50 – 51.
3. **Yao, J. J.** A surface micromachined miniature switch for telecommunication applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz / J. J. Yao, M. F. Chang // Transducers'95. – 1995. – P. 384 – 387.

4. **Larson, L. E.** Micromachined microwave actuator (MIMAC) technology – a new tuning approach for microwave integrated circuits / L. E. Larson, R. H. Hackett, M. A. Melendes, R. F. Lohr // IEEE Microwave Theory Tech. Symp. – 1991. – P. 27 – 30.
5. **Goldsmith, C.** Micromechanical membrane switches for microwave applications / C. Goldsmith, T. H. Lin, B. Powers, R. W. Wen, B. Norvell // IEEE Microwave Theory Tech. Symp. – May 1995. – Vol. 1. – P. 91 – 94.
6. **Goldsmith, C.** Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies / C. Goldsmith, J. Randall, S. Eshelman, T. H. Lin, D. Denniston, S. Chen, B. Norvell // IEEE Microwave Theory Tech. Symp. – June 1996. – Vol. 2. – P. 1141 – 1144.
7. **Rebeiz, G. M.** RF MEMS, theory, design and technology / G. M. Rebeiz. – John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 2004.
8. **Лысенко, И. Е.** Разработка ВЧ МЭМС-переключателя емкостного типа с перфорированной металлической мембраной / И. Е. Лысенко, А. В. Ткаченко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – 02. – С. 6 – 16.
9. **Lysenko, I. E.** Research of the microelectromechanical switch with different materials of metal membrane / I. E. Lysenko, A. V. Tkachenko, O. A. Ezhova // Proceedings of the International Conference «Micro- and Nanoelectronics – 2018». – October 1 – 5, 2018. – P. 125.
10. **Lysenko, I. E.** Analytical approach in the development of RF MEMS switches / I. E. Lysenko, A. V. Tkachenko, E. V. Sherova, A. V. Nikitin // Electronics. – 2018. – 7 (12), 415. – P. 1 – 23.
11. **Kingsley, N.** Reconfigurable RF MEMS phased array antenna integrated within a liquid crystal polymer (LCP) system-on-package / N. Kingsley, G. E. Ponchak // IEEE Trans Antennas Propag. – 2008. – 56 (1). – P. 108 – 118.
12. **Vaha-Haikkila, T.** RF MEMS impedance tuners for 6 – 24 GHz applications / T. Vaha-Haikkila // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2007. – 17 (3). – P. 265 – 278.
13. **Baldemair, R.** Ultra-dense networks in millimeter-wave frequencies / R. Baldemair, T. Irnich, K. Balachandran, E. Dahlman, G. Mildh, Y. Selen, S. Parkvall, M. Meyer, A. Osseiran // IEEE Communications Magazine. – 2005. – 53 (1). – P. 202 – 208.
14. **Dohler, M.** The tactile internet IoT, 5G and cloud on steroids / M. Dohler // Proceedings of 5G Radio Technology Seminar. Exploring Technical Challenges in the Emerging 5G Ecosystem. – London, 17 March 2015. – P. 1 – 16.
15. **Fettweis, G. P.** The tactile internet: applications and challenges / G. P. Fettweis // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2014. – 9 (1). – P. 64 – 70.
16. **Robin, L.** Status of the MEMS industry / L. Robin // Tech. Rep.; Yole Developpement: Phoenix, AZ, USA. – 2017. – P. 2.
17. **Simons, R. N.** Coplanar waveguide circuits, components and systems / R. N. Simons. – New York: John Wiley & Sons., 2001. – P. 464.
18. **Noguchi, Y.** Analysis of characteristics of the coplanar waveguide with ground planes of finite extent / Y. Noguchi, N. Okamoto // Trans. IECE. – Japan Dec. 1975. – Vol. 58-B, No 12. – P. 679 – 680.
19. **Veyres, C.** Extension of the application of conformal mapping techniques to coplanar lines with finite dimensions / C. Veyres, V. F. Hanna // Int. J. Electron. – Jan. 1980. – Vol. 48, No 1. – P. 47 – 56.
20. **Chen, E.** Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: modeling and experiments / E. Chen, S. Y. Chou // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – June 1997. – Vol. 45, No 6. – P. 939 – 945.
21. **Collin, R. E.** Foundations for microwave engineering / R. E. Collin. – New York: McGraw-Hill, 1992. – P. 178 – 179.
22. **Ocera, A.** A MEMS-reconfigurable power divider on high resistivity silicon substrate / A. Ocera, P. Farinelli, F. Cherubini, P. Mezzanotte, R. Sorrentino, B. Margesin, F. Giacomozzi // Microwave Symposium. IEEE MTT-S International. – 2007. – P. 501 – 504.

Статья поступила 13 марта 2019 г.

# МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.38:61

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭФФЕКТОВ КВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕЖКЛЕТОЧНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПЛАЗМЕ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

К. Д. Казаринов, О. А. Баранова, В. А. Щелконогов, А. В. Чеканов

*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино*

Представлены экспериментальные результаты изучения влияния КВЧ-излучения на процесс агрегации тромбоцитов в плазме крови человека. КВЧ-облучение низкой интенсивности в длинноволновой области снижало уровень агрегации тромбоцитов, измеренной после воздействия на клетки электромагнитного излучения. Предложен механизм наблюдаемого эффекта, связанный со слабым тепловым воздействием КВЧ-облучения на мембраны тромбоцитов.

*КС: КВЧ-излучение, агрегация тромбоцитов, обогащенная тромбоцитами плазма, механизм мембранотропности, индукторы агрегации*

## EXPERIMENTAL RESULTS OF STUDYING THE EFFECTS OF EHF-RADIATION ON CELL-CELL INTERACTIONS IN HUMAN BLOOD PLASMA

K. D. Kazarinov, O. A. Baranova, V. A. Shchelkonogov, A. V. Chekanov

*FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino*

The experimental results of studying the effect of EHF-radiation on the platelet aggregation process in human blood plasma are presented. EHF-radiation of low intensity in long-wave area reduced the level of the platelet aggregation measured after exposure of the cells to electromagnetic radiation. A mechanism of the observed effect connected with a weak thermal effect of EHF-radiation on platelet membranes is proposed.

*Keywords: EHF-radiation, platelet aggregation, plasma enriched with platelets, mechanism of membranotropy, aggregation inducers*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Воздействие электромагнитных полей (ЭМП) на окружающую среду растет из года в год. Причем не только увеличивается интенсивность электромагнитного фона, но и меняются характеристики электромагнитных сигналов. И даже если средний уровень фона электромагнитного излучения (ЭМИ) по значительной территории невелик, то локальные и временные характеристики могут отличаться на порядки величин. В частности, это касается персонала, обслуживающего оборудование систем связи, медицинские приборы, локационные станции, а также системы безопасности в общественных местах. С другой стороны, известен положительный терапевти-

ческий эффект и разрабатываются все новые и новые методы лечения различных заболеваний при использовании ЭМИ [1–3]. Воздействие ЭМИ на клетки человека, по мнению авторов работы [4], может вызывать программируемую смерть клеток (апоптоз), модификацию дифференциации клеток, адаптивную реакцию клеток, изменение процессов пролиферации и другие важные биологические процессы.

Механизмы, с помощью которых КВЧ-излучение способно производить системные эффекты всего организма при локальных воздействиях, где проникновение осуществляется на небольшую глубину, до сих пор недостаточно изучены. Эта ситуация таит в себе, с одной стороны, нераскрытые возможности КВЧ-терапии, а с другой – возможную опасность для здоровья людей при использовании данного вида излучения.

В данной работе рассматривается один из аспектов применения КВЧ-излучения в медицинских приложениях, а именно как фактор коррекции нарушений реологических свойств крови в клинической практике.

Нарушение функционирования головного мозга происходит вследствие развивающегося ишемического повреждения, в результате которого прекращается доставка к нему кровью кислорода и глюкозы, что приводит к нарушению мозгового кровоснабжения и последующему повреждению мозговой ткани [5].

Происходит активизация сосудисто-тромбоцитарного звена гемостаза и нарушение реологических свойств крови – повышение свертываемости, которое может привести к опасным последствиям для организма, тромбообразованию [6–8]. Развивается также воспаление, которое способствует повреждению гематоэнцефалического барьера, что ведет к дальнейшему повреждению мозговой ткани. Нарастающий окислительный стресс приводит к образованию активных форм кислорода, которые интенсивно взаимодействуют с молекулярными соединениями, формирующими нейрональные и внутриклеточные мембраны [9, 10].

Применение нейропротективных и антиоксидантных препаратов вызывает снижение развития острого повреждения нейрональной ткани и способствует восстановлению функций мозга [11]. В качестве адекватной терапии на сегодняшний день применяют различные подходы, в том числе водорастворимую форму  $\alpha$ -липоевой кислоты. Данный лекарственный препарат используется как антиоксидант при лечении острого и хронического воспаления периферической нервной системы. Однако биодоступность этого средства невысока из-за воздействия ферментных систем организма, быстрой деградации, отсутствия возможности пройти через гематоэнцефалический барьер.

Одной из основных причин сосудистых патологий является функционирование тромбоцитов – клеток кровяного русла. Активация этих клеток приводит не только к образованию сгустка – субстрата атеротромбоза, но и к формированию значительного набора биохимических веществ. Такая универсальность позволяет этим клеткам выполнять ключевую роль как в системе гемостаза, так и в регуляции репаративных процессов. Повышенная агрегация тромбоцитов лежит в основе патогенеза большого количества заболеваний. Тромбоциты, как известно, являются одними из основных участников сосудистых катастроф при ишемической болезни сердца. Однако не всегда удается преодолеть агрегацию тромбоцитов и предотвратить развитие тромботических осложнений с помощью антитромбоцитарных препаратов. Попыткой преодолеть некоторые нежелательные явления, связанные с активацией тромбоцитов, а также регламентировать их участие в различных патологических состояниях, обусловлен поиск иных подходов к проблеме, в том числе и рассмотрение участия в апоптозе этих клеток известных ин-

дукторов агрегации: коллагена, арахидоновой кислоты, тромбина, АДФ, ионофора кальция А23187 и др. [12].

Установлен бимодальный характер влияния в зависимости от величины концентрации индуктора. При низких концентрациях наблюдается активация тромбоцитов, а при высоких – запускается программа апоптоза (транслокация фосфатидилсерина с внутренней поверхности цитоплазматической мембраны на внешнюю, открытие гигантских митохондриальных пор и выход *сyt c*, каскадная активация каспаз и фрагментация клетки для последующей утилизации фагоцитами). При апоптозе прерываются патологические процессы, приводящие к стимуляции тромбообразования. Модулируя с помощью микроволнового излучения активацию тромбоцитов, мы тем самым можем осуществлять выбраковку различных субпопуляций тромбоцитов [13].

С начала 21 века стало известно, что апоптозу (программируемой смерти клеток) подвергаются не только ядродержащие, но и безъядерные клетки, такие, как эритроциты [14] и тромбоциты [15].

В данной статье рассматривается только случай низких концентраций индуктора, приводящий к коррекции агрегационной функции тромбоцитов.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Химические реактивы.** Все соли, используемые в работе для приготовления буферных растворов, были получены от фирмы «Sigma-Aldrich» (США),  $C_{40}H_{70}N_5O_{11}P$  – «AvantiPolarLipids» (США), фосфатидилхолин – «AvantiPolarLipids» (США),  $\alpha$ -липоевая кислота – «Sigma-Aldrich» (США), этилендиаминовая соль  $\alpha$ -липоевой кислоты – «Sigma-Aldrich» (США), арахидоновая кислота – НПО «Ренам» (Россия),  $C_2H_{50}N$  – «ХимМед» (Россия).

**Получение обогащенной тромбоцитами плазмы (ОТП).** В соответствии с протоколами, утвержденными Федеральным медико-биологическим агентством (Россия), венозную кровь собирали от здоровых доноров с 3,8%-ным цитратом натрия VACUETTE кат. № 456080 в качестве антикоагулянта. Объем любых добавок к крови в наших экспериментах составлял не более 10 % от общего объема образца. Кровь забиралась в полистироловые вакуумные пробирки. Стабилизированную цитратом натрия кровь центрифугировали 10 мин при 200g со скоростью 1000 об/мин для получения ОТП. Далее ОТП отбиралась в чистую пробирку. Оставшуюся плазму повторно центрифугировали в течение 25 мин при 400g со скоростью 2800 об/мин. Получали бедную тромбоцитами плазму (БТП). Далее БТП отбирали в отдельную чистую пробирку. Образцы инкубировали при +37 °С не более 3 ч.

**Агрегометрия.** С целью определения агрегационной активности КВЧ-излучения производили агрегометрию тромбоцитов с использованием прибора AggRam Helena (Великобритания) при температуре 37 °С. Проба представляла собой 225 мкл плазмы крови донора. Измерительная длина волны – 650 нм. Для перемешивания использовались магниты с покрытием размерами 3,5×4 мм. В течение одной минуты регистрировали спонтанную агрегацию тромбоцитов, после чего добавляли индуктор активации с конечной концентрацией в образце 0,1 мг/мл. В качестве активатора использовали водный раствор ристомидина. В ходе работы оценивались степень агрегации и скорость агрегации тромбоцитов. Кинетику агрегации регистрировали в течение 10 мин.

**Установка для КВЧ-облучения.** В качестве источника микроволнового излучения использовался генератор на основе диода Ганна с частотой в диапазоне 32,9...39,6 ГГц (длина волны

соответственно от 9,1 до 7,6 мм) и мощностью излучения от 3 до 30 мВт. Установка микроволнового облучения обеспечивала подведение излучения к исследуемому объекту с помощью волновода сечением  $7,2 \times 3,4$  мм<sup>2</sup> с согласующими элементами. Осуществлялся контроль режима бегущей волны, мощности микроволнового излучения и длины волны излучения. Образцы подвергались микроволновому воздействию в ближнем поле рупорной антенны, расположенной вертикально, и находясь над ней на расстоянии 6 см от открытого конца рупора, т. е. в ближней зоне облучателя. Образцы перемешивали осторожным встряхиванием каждые 5 мин. Температуру в образцах измеряли с использованием волоконно-оптического микротермодетектора МТ-4МО (Россия) с точностью 0,05 °С.

**Статистическая обработка.** Полученные результаты обрабатывались с помощью программ Excel (Microsoft office) и Statistica, версия 6, StatSoft Corporation (USA). Для анализа различий количественных признаков в трех и более несвязанных группах использовался статистический критерий Краскелла-Уоллиса ANOVA, в двух несвязанных группах применялся критерий Манна-Уитни. Достоверными считались различия при  $p < 0,05$ .

### 3. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Общеизвестно, что в процессе ишемического повреждения развивается воспалительная реакция как ответ организма на повреждение сосудистого эндотелия, а в случае инфаркта мозга происходит проникновение токсических веществ из сосудистого русла в мозговую ткань. Это вызывает запуск каскада оксидативных и прокоагулянтных реакций, в результате которых происходит активация клеток микроглии, что приводит к главной утрате – гибели жизненно важных нейронов с формированием инфарктного очага. Поэтому для предотвращения данного патологического процесса и снижения последствий от его наличия необходимо воздействовать на систему гемостаза, чтобы нарушить «замкнутый» сигнальный круг. К важнейшим проблемам современной медицины причисляют различные тромбозмболические явления, которые возникают при избыточной активности тромбоцитов. Для лечения и профилактики ишемических нарушений кровообращения у больных применяют антитромбоцитарные антиагрегатные препараты [16]. Однако, несмотря на значительные усилия, приложенные в этом направлении, проблема еще далека до своего разрешения. Поэтому наряду с медикаментозными средствами в медико-биологических исследованиях все чаще предлагаются электромагнитные воздействия с целью коррекции нарушений реологических свойств крови. К этим воздействиям относятся низкоинтенсивные световые и микроволновые излучения.

Так, в работе [17] приведены результаты изучения воздействия ЭМИ КВЧ на крыс, подвергшихся предварительному острому  $\gamma$ -облучению в дозе 1 Гр. Изучалось состояние агрегационной способности тромбоцитов. Было установлено, что у животных, подвергнутых  $\gamma$ -облучению, последующее воздействие ЭМИ КВЧ приводит к нормализации всех показателей агрегации как в ближайшие, так и в отдаленные сроки постлучевого периода. Характер наблюдаемых эффектов ЭМИ КВЧ (39,5 ГГц) зависел также от индивидуальных особенностей организма.

В работе саратовских ученых было установлено, что КВЧ-облучение в определенных условиях вызывает значительное ингибирование функциональной активности тромбоцитов в нативной плазме по сравнению с контролем [18].

Влияние микроволнового излучения на частоте 2450 МГц на тромбоциты у собак было про-

анализировано *in vitro* путем изучения агрегации, активированной аденозин-5-дифосфатом. При плотностях мощности, превосходящих 10 мВт/см<sup>2</sup>, были продемонстрированы различные проявления агрегации тромбоцитов: гиперагрегация, уменьшенная скорость агрегации, пониженная агрегация, восстановление. Отсутствие эквивалентных реакций агрегации с изотермическим проводящим нагревом авторы работы связывают с различиями в скорости нагревания образца [19].

В наших экспериментах ОТП инкубировали при комнатной температуре в условиях КВЧ-облучения в течение 30 мин и переносили в прибор AggRam Helena (Великобритания) для измерения уровня и скорости агрегации тромбоцитов. В результате был получен набор агрегатограмм. Типичная кинетика агрегации представлена на рис. 1. В ходе работы оценивались степень и скорость агрегации тромбоцитов. Кинетику агрегации регистрировали в течение 10 мин.

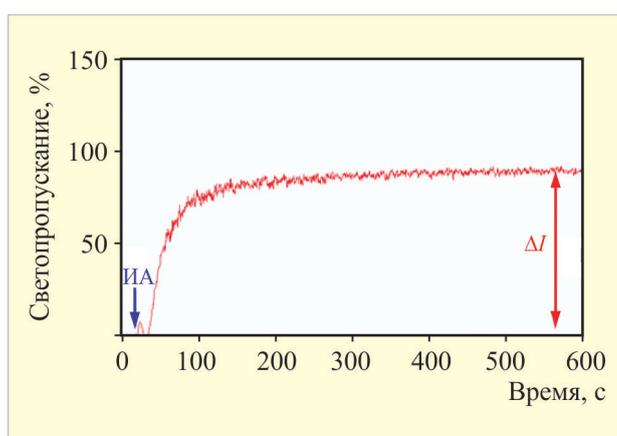


Рис. 1. Типичная кинетика агрегации тромбоцитов при добавлении индуктора агрегации арахидоновой кислоты;  $\Delta I$  — конечная степень агрегации, %. При добавлении индуктора (показано стрелкой) тромбоциты активизируются, изменяется дисковидная форма клеток на сферическую с шипами, что сопровождается быстрым увеличением пропускания света (малый пик)

На рис. 2 представлена одна из реализаций проведенного нами эксперимента по изучению влияния КВЧ-излучения на степень агрегации тромбоцитов в ОТП.

Итоговые результаты нашего предварительного эксперимента представлены на рис. 3 и 4. Как следует из приведенных рисунков, КВЧ-излучение снижает степень агрегации по сравнению с контролем при добавлении индуктора ристомицина. Кроме того, представленные результаты показывают, что КВЧ-излучение изменяет угол наклона по сравнению с контролем при добавлении того же индуктора. Аналогичный эффект наблюдался также и при агрегации тромбоцитов коллагеном. Однако наиболее выраженный эффект имел место при использовании ристомицина, что, возможно, является косвенным отражением влияния КВЧ-излучения на активность фактора фон Виллибранда, т. е. на высвобождение этого гликопротеина из  $\alpha$ -гранул тромбоцитов. Как известно, фактор фон Виллибранда не только включает внешний и внутренний механизмы коагуляции, но и активирует противосвертывающую систему, предупреждая таким образом избыточное тромбообразование.

Обсуждая механизм наблюдаемого эффекта действия КВЧ-излучения на процесс агрегации тромбоцитов индуцированный ристомицином, следует учесть наличие двух структурных пере-

ходов в мембранах тромбоцитов при изменении температуры в области 10...30 °С. Переход при 23...25 °С инициируется в липидной фазе, а при температурах 13...14 °С – в белках. При этих же температурах происходят изменения скорости агрегации тромбоцитов под действием агрегирующих агентов. Так что температура облучаемого в эксперименте образца может рассматриваться как один из регуляторных факторов агрегационной способности тромбоцитов.

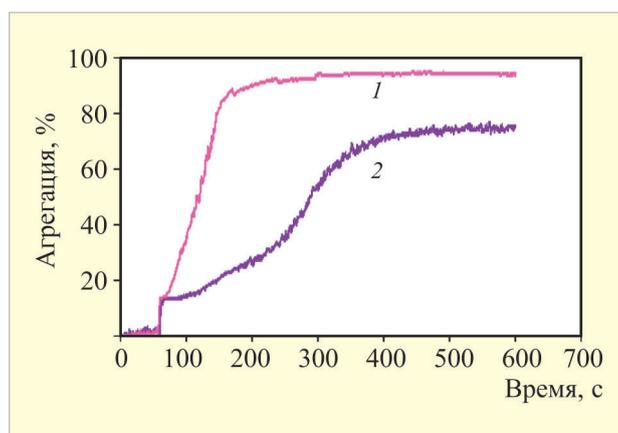


Рис. 2. Пример реализации агрегации тромбоцитов при добавлении индуктора агрегации ристомидина. Образец содержит 225 мкл плазмы донора и 25 мкл индуктора ристомидина с конечной концентрацией в образце 0,1 мг/мл:

1 – контроль: образец размещается в зоне рупора без СВЧ-облучения; 2 – СВЧ-облучение интенсивностью 40 мВт/см<sup>2</sup> при длине волны 7,9 мм в течение 30 мин

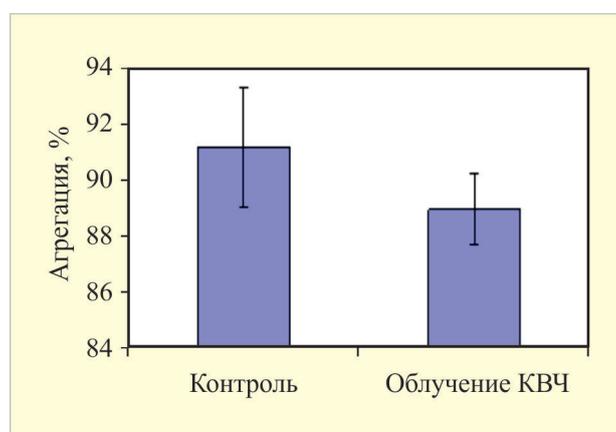


Рис. 3. Результаты статистической обработки экспериментальных данных, показывающие, что СВЧ-облучение снижает степень агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индуктора ристомидина (условия облучения те же, что и на рис. 2)

Избыточное образование свободных радикалов в организме, или окислительный (оксидативный) стресс, вызванный воздействием микроволнового облучения, в последнее время рассматривается некоторыми авторами как один из основных механизмов биологической активности микроволн [20–22]. В ряде исследований было показано, что микроволны могут влиять на различные процессы, связанные с развитием окислительного стресса: изменение

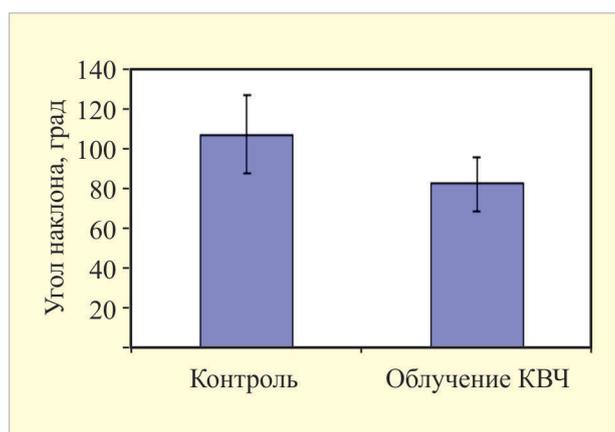


Рис. 4. Результаты статистической обработки экспериментальных данных, показывающие, что КВЧ-облучение уменьшает угол наклона агрегатограммы (скорость агрегации тромбоцитов) в 1,2 раза по сравнению с контролем при добавлении индуктора ристомицина (условия облучения те же, что и на рис. 2)

структуры и функции ферментов, в частности усиление активности пероксидаз [23–24], интенсивность свободнорадикальных процессов в клетках и тканях и усиление активации клеток. С другой стороны, показано [25], что процесс перекисного окисления липидов может участвовать в регуляции агрегационной активности тромбоцитов. Таким образом, можно предположить, что микроволновое облучение, стимулируя увеличение скорости образования свободных радикалов в ОТП, может регулировать агрегационную активность тромбоцитов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в данной работе результаты свидетельствуют о том, что КВЧ-облучение низкой интенсивности в условиях нашего эксперимента способно уменьшить уровень агрегации тромбоцитов. Эффект облучения проявлялся в снижении степени агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индуктора агрегации ристомицина, а также в уменьшении угла наклона агрегатограммы (скорости агрегации тромбоцитов). Предложен мембранный механизм обнаруженного эффекта – влияние КВЧ-излучения низкой интенсивности на процесс агрегации тромбоцитов, который существенно расширяет наши прежние представления о мембранотропном действии микроволнового излучения [26]. Дальнейшие наши исследования механизма обнаруженного эффекта предполагают изучение влияния, помимо температуры образца, рН среды, а также перекисного окисления липидов как механизма регуляции агрегационной активности тромбоцитов при микроволновом облучении.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ордынская, Т. А.** Волновая терапия / Т. А. Ордынская, П. В. Поручиков, В. Ф. Ордынский. – М.: Эксмо. – 2008. – 496 с.
2. **Мырзабаева, Н. А.** Применение лазеро- и КВЧ-пунктуры в эрадикационной терапии больных с функциональной диспепсией, ассоциированной с *Helicobacter pylori* / Н. А. Мырзабаева // Терапевтический вестник. – 2009. – № 4 (24). – С. 48 – 49.

3. **Teppone, M.** Extremely high-frequency therapy in oncology / M. Teppone, R. Avakyan // *J. Altern Complement Med.* – 2010. – Vol. 16 (11). – P. 1211 – 1216.
4. **Szabo, I.** Millimeter wave induced reversible externalization of phosphatidylserine molecules in cells exposed in vitro / I. Szabo, J. Kappelmayer, S. I. Alekseev, M. C. Ziskin // *Bioelectromagnetics.* – 2006. – Vol. 27. – P. 233 – 244.
5. **Moskowitz, M. A.** / M. A. Moskowitz, E. H. Lo, C. Iadecola // *Neuron. J.* – 2010. – Vol. 67. – P. 181 – 198.
6. **Wang, J. Y.** / J. Y. Wang, D. H. Zhou, J. Li et al. // *Cerebrovasc Dis.* – 2006. – Vol. 21 (1–2). – P. 67 – 73.
7. **Miao, Yanying** / Yanying Miao, James K. Liao // *Expert Rev. Neurother.* – 2014. – Vol. 14 (2). – P. 173 – 185.
8. **Rallidis, L. S.** / L. S. Rallidis, M. G. Zolindaki, M. Vikelis, K. Kaliva, C. Papadopoulos, D. Th. Kremastinos // *Int. J. Cardiol.* – 2009. – Vol. 132 (2). – P. 216 – 220.
9. **Mocsai, Attila** / Attila Mocsai, BarbaraWalzog, Clifford A. Lowell // *Cardiovascular Research.* – Vol. 107. – P. 373 – 385.
10. **Castillo, J.** / J. Castillo, J. Alvarez-Sabnn, E. Martnnez-Vila et al. // *Neuron. J.* – 2009. – Vol. 256 (2). – P. 217 – 224.
11. **Sahota, P.** / P. Sahota, S. I. Savitz // *Neurotherapeutics.* – Vol. 8, No 3. – P. 434 – 451.
12. **Werio, L.** Surface expression and functional characterization of alpha-granule factor V in human platelets: effects of ionophore A23187, thrombin, collagen, and convulxin / L. Werio, O. Safa, K. J. Clemetson et al. // *Blood.* – 2000. – Vol. 95. – P. 1694 – 1702.
13. **Березовская, Г. А.** Апоптоз тромбоцитов: причины недостаточной эффективности антитромбоцитарных препаратов / Г. А. Березовская // *Бюллетень СО РАМН.* – 2011. – Т. 32, № 4. – С. 17 – 27.
14. **Birka, C.** Enhanced susceptibility to erythrocyte «apoptosis» following phosphate depletion / C. Birka, A. P. Lang, S. D. Kempe et al. // *Eur. J. Physiol.* – 2004. – Vol. 448. – P. 471 – 477.
15. **Leytin, V.** Intravenous immunoglobulin inhibits anti-GPIIb-induced platelet apoptosis in a murine model of ITP / V. Leytin, S. Mukhaylov, A. F. Starkey et al. // *Br. J. Haematol.* – 2006. – Vol. 133. – P. 78 – 82.
16. **Котова, О. В.** / О. В. Котова, Е. С. Акарачкова // *Фарматека.* – 2010. – № 8. – С. 57 – 61.
17. **Буланова, К. Я.** Использование электромагнитных излучений КВЧ (39,5 ГГц) для коррекции радиационно-индуцированных изменений агрегационной способности тромбоцитов белых крыс / К. Я. Буланова, Л. М. Лобанок, А. В. Бакунович, А. Ю. Жив, Т. И. Милевич // *Медицинский журнал (Беларусь).* – 2014. – № 3 (49). – С. 60 – 64.
18. **Kirichuk, V. F.** EHF-interactions in a system of live objects (human platelets) / V. F. Kirichuk, A. V. Maïborodin, M. V. Volin, A. P. Krenitskiï, V. D. Tupikin // *Tsitologiya.* – 2001. – Vol. 43 (12). – P. 1115 – 1122.
19. **Bushberg, J. T.** Effects of 2450 MHz continuous wave microwave radiation and isothermal conduction on canine platelet aggregometry, survival and margination: Dissertation / J. T. Bushberg. – Purdue University, 1982.
20. **Barteri, M.** Effects of microwaves (900 MHz) on peroxidase systems: a comparison between lactoperoxidase and horseradish peroxidase / M. Barteri, R. De Carolis, F. Marinelli, G. Tomassetti, L. C. Montemiglio // *Electromagnetic Biology Medicine.* – 2016. – Vol. 35. – P. 126 – 133.
21. **Hou, Q.** Oxidative changes and apoptosis induced by 1800-MHz electromagnetic radiation in NIH/3T3 cells / Q. Hou, M. Wang, S. Wu, X. Ma, G. An, H. Liu, F. Xie // *Electromagnetic Biology Medicine.* – 2015. – Vol. 34. – P. 85 – 92.
22. **Meena, R.** Therapeutic approaches of melatonin in microwave radiations induced oxidative stress mediated toxicity on male fertility pattern of Wistar rats / R. Meena, K. Kajal, J. Kumar et al. // *Electromagnetic Biology Medicine.* – 2014. – Vol. 33. – P. 81 – 91.
23. **Marjanovic, A. M.** Cell oxidation-reduction imbalance after modulated radiofrequency radiation / A. M. Marjanovic, I. Pavicic, I. Trosic // *Electromagnetic Biology Medicine.* – 2015. – Vol. 34. – P. 381 – 386.
24. **Manna, D.** Effect of radiofrequency radiation in cultured mammalian cells: a review / D. Manna, R. Ghosh // *Electromagnetic Biology Medicine.* – 2016. – Vol. 35. – P. 265 – 301.
25. **Шаталина, Л. В.** Перекисное окисление липидов как механизм регуляции агрегационной активности тромбоцитов / Л. В. Шаталина // *Кардиология.* – 1993. – Т. 10, № 33(1). – С. 25 – 28.
26. **Казаринов, К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн / К. Д. Казаринов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 2018. – Вып. 2 (537). – С. 62 – 75.

Статья поступила 25 февраля 2019 г.

# ЭКОНОМИКА

УДК 658.012.4

## СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НАУКОЕМКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Е. В. Мамонтова**

*ЗАО «Трубопроводные системы и технологии», г. Щелково*

**А. А. Вершинин**

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

При создании продукции на предприятиях наукоемкого машиностроения необходимо учитывать и управлять рисками, которые могут возникнуть в процессе производства. Внедрение системы менеджмента качества, включающей в себя понятие «риск-ориентированное мышление», позволит верно планировать развитие наукоемкого машиностроения на предприятии.

*КС: система менеджмента качества, риск-ориентированное мышление, риск, наукоемкое машиностроение*

## QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AND RISK MANAGEMENT IN HIGH-TECH ENGINEERING ENTERPRISES

**E. V. Mamontova**

*CJSC «Pipeline systems and technologies», Shchelkovo*

**A. A. Vershinin**

*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

When creating products in high-tech engineering enterprises, it is necessary to take into account and manage the risks that may arise in the production process. The quality management system which includes the concept of «risk-oriented thinking» will allow to plan correctly the development of high-tech engineering in the enterprise.

*Keywords: quality management system, risk-oriented thinking, risk, high-tech engineering*

В современных условиях бизнеса конкурентоспособность наукоемких предприятий машиностроения зависит не только от их научно-производственного задела, но и от качества выпускаемой продукции. Предприятие должно гарантировать потребителю стабильность и надежность качества выпускаемой продукции.

На начальном этапе становления системы управления качеством существовала система TQC (total quality control), специфика которой заключалась в таких вопросах, как объем выпускаемой продукции, сроки поставки, затраты и качество. Позже появляется совершенно иная система – TQM (total quality management), где на первый план выдвигается качество продукции и вся работа предприятия подчиняется этой цели, появляется система менеджмента качества.

Этап развития системного комплексного подхода управления качеством затронул и предприятия СССР. Начиная с 1950-х годов в СССР стали появляться такие системы, как:

- Саратовская система бездефектного изготовления продукции (БИП). Основа системы – самоконтроль труда, исполнитель несет ответственность за качество продукции. Недостаток системы – контролировалась только стадия изготовления продукции.
- Ярославская научная организация работ по увеличению моторесурса (НОРМ). Основа системы – планомерный системный контроль моторесурсов двигателей и циклическое увеличение на основе повышения надежности всех деталей, определяющих планируемый моторесурс. Контроль осуществлялся на всех стадиях жизненного цикла продукции.
- Рыбинская научная организация труда, производства и управления (НОТПУ). Основа системы – комплексное использование методов научной организации труда, производства и управления с постоянным совершенствованием технологии и технологического оборудования на каждом рабочем месте.
- Горьковская система – качество, надежность ресурса с первых изделий (КАНАР-СПИ). Основа системы – комплекс инженерно-технических и организационных мероприятий, обеспечивающих выпуск продукции высокого качества и надежности с первых образцов.

В 1957 году появляется серия международных стандартов на системы менеджмента качества ISO 9000. Данный этап оказал огромное влияние на организации, и до сих пор они продолжают внедрять данную систему для того, чтобы устоять на рынке.

Так как система менеджмента качества является мощным инструментом, выявляющим несоответствия выпускаемой продукции критериям оценки, которые могут привести к опасным последствиям, то внедрение данной системы обязательно на наукоемких предприятиях машиностроения, так как данная система позволит осуществлять грамотный контроль качества на всех этапах жизненного цикла продукции, а именно: от разработки, проектирования и научно-исследования, где формируются свойства качества и надежности и определяются основные затраты, до утилизации. Главное в менеджменте качества – это организация процессов производства, установление контрольных точек, которые гарантируют выпуск качественной продукции с заданным уровнем надежности (95 %).

В современных условиях одним из основных критериев надежности предприятия – поставщика продукции является используемая системы менеджмента качества, которая должна соответствовать стандартам серии ИСО 9000.

Внедрение системы менеджмента качества на наукоемких предприятиях машиностроения при эффективном ее функционировании позволит добиться повышения качества выпускаемой продукции и снизить вероятность появления брака, т. к. одним из критериев системы менеджмента качества является применение процессного подхода, который способствует результативности и эффективности предприятия в достижении намеченных целей. Без применения данного подхода предприятию будет сложно управлять возникающими взаимосвязями, отвечать постоянно меняющимся требованиям потребителя и условиям рынка, учитывать возможные несоответствия и последствия.

При выполнении планов по производству наукоемкой продукции необходимо учитывать различные риски. Результаты деятельности предприятий, которая складывается в сложных условиях внешней среды и из различных производственных факторов, не предсказуемы и имеют различные неопределенности.

В качестве предложения по улучшению управления возможными несоответствиями и анализа

их последствий предприятию следует применять на всех стадиях производства продукции требования системы менеджмента качества в управлении своей деятельностью в части «риск-ориентированного мышления».

Понятие «риск-ориентированное мышление» появляется в стандарте ГОСТ Р ИСО 9001-2015 в пн. 0.1 «Общие положения», где отмечается, что одним из основных преимуществ является направление усилий на риски и возможности, связанные со средой и целями организации [1].

Применение риск-ориентированного мышления позволит организации верно идентифицировать источники риска, области воздействия, события и их причины, а также их потенциальные последствия и разработать для себя стратегию по осуществлению своей деятельности по нивелированию рисков.

Предприятия наукоемкого машиностроения требуют особого внимания и являются наиболее уязвимыми в связи с тем, что они отличаются высокой стоимостью НИОКР и стоимостью оборудования, длительным жизненным циклом товара или процесса производства и зависимостью от поставщиков и инвесторов [4].

Среди возможных рисков, с которыми может столкнуться предприятие наукоемкого машиностроения, можно выделить следующие:

- 1) риск особенности концепции производства изделия, риск возможности практического воплощения НИР;
- 2) риск недофинансирования производства;
- 3) риск дефицита квалифицированных кадров;
- 4) риск неточности и полноты нормативной документации и технического регулирования;
- 5) риск коммерческой реализуемости наукоемкой продукции.

Одним из распространённых методов анализа рисков является FMEA (failure mode effect analysis). FMEA – это анализ видов и последствий отказов [2]. FMEA используют на различных стадиях, таких, как проектирование, производство и эксплуатация конечного продукта, при анализе видов отказов систем и процессов, определении последствий влияния человеческого фактора, обслуживании технических систем, для использования информации при других методах анализа.

Достоинства данного метода анализа рисков являются: систематический поиск причин и последствий отказов, идентификация критических отказов, определение мер по снижению риска. В качестве недостатков данного метода выделяют невозможность его применения для анализа временных последовательностей, условий окружающей среды и большой объем полученной информации в несложных системах.

При планировании научно-технического развития, где необходимо на начальном этапе минимизировать риски, в качестве основных методов управления риском используются: организация конкурсного проектирования, метод многовариантного планирования и корректировки планов, метод резервирования финансовых ресурсов, метод уклонения, однако отсутствует комплексный подход к применению всей совокупности рассмотренных методов при формировании и реализации планов развития наукоемких производств [3].

На сегодняшний день развитие проектов по созданию наукоемкой продукции, которые реализуются отечественными предприятиями, требует создания определенных методов и стратегий по управлению рисками, которые присущи научно-технической деятельности, что позволит предусмотреть и снизить вероятность появления риска [5].

Таким образом, внедрение и применение системы менеджмента качества позволит упорядочить

деятельность внутри организации путем описания и мониторинга основных и вспомогательных процессов на всех этапах производства наукоемкой продукции, идентифицировать риски и опасности, которые могут повлечь за собой затраты на различных стадиях производства, повысить организацию планирования работ при проектировании, что, в свою очередь, важно, так как увеличение сроков разработки наукоемкой продукции может привести к её моральному износу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015.
2. Вопросы классификации рисков наукоемких производств при осуществлении инновационной деятельности [Электронный ресурс]. – 2012. – <http://masters.donntu.org/2012/iem/pankova/library/article4.htm> (дата обращения 15.04.2019).
3. ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности (с поправкой). – М.: Стандартинформ, 2005.
4. Производственные риски и экономические опасности современных наукоемких производств / КубГАУ. – 2016.
5. Формирование методологии экономической безопасности наукоемких и высокотехнологичных производств и инструментария для ее оценки и мониторинга [Электронный ресурс]. – [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project\\_search/o\\_2006237](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_2006237) (дата обращения 15.04.2019).

*Статья поступила 7 мая 2019 г.*

#### НОВЫЕ КНИГИ

ГОРГАДЗЕ С. Ф., БОКК Г.О. **Планирование и обработка результатов эксперимента в радиотехнике и инфокоммуникационных системах.** Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 132 с.: ил.

Рассмотрены принципы организации и основные подходы к планированию, проведению и обработке результатов эксперимента в приложениях к радиотехническим и инфокоммуникационным устройствам и системам. Наряду с общими классическими методами статистической дисциплины планирования эксперимента и статистической обработки его результатов, проиллюстрированными расчетными примерами, рассмотрены и вопросы организации компьютерных экспериментов при моделировании радиотехнических устройств и систем. Многофакторные модели на основе статистических уравнений регрессии дополнены важными для радиотехнических приложений однофакторными моделями нелинейных объектов, описываемыми рядами Вольтёрры и Тейлора.

Для студентов, обучающихся по направлениям 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 11.04.01 – «Радиотехника» (квалификации «магистр»), может быть полезно специалистам.

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 531.5

### ДВИЖЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАЯТНИКА В ПОЛЕ ЦЕНТРАЛЬНЫХ СИЛ

**И. А. Балыко, Е. В. Терешкин, С. М. Дерябкина, А. К. Балыко**

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

**И. И. Спиричев**

*Московский государственный технический университет им. Н. Баумана*

### THE MOVEMENT OF PHYSICAL AND ELECTRIC PENDULUM IN THE FIELD OF CENTRAL FORCES

**I. A. Balyko, E. V. Tereshkin, S. M. Deryabkina, A. K. Balyko**

*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

**I. I. Spirichev**

*Bauman Moscow State Technical University*

Маятники являются одними из простейших и древнейших физических приборов, с помощью которых человек начал постигать законы Природы. Движением маятников серьезно занимался выдающийся ученый Исаак Ньютон, три столетия назад сформулировавший непоколебимые до сих пор законы в различных разделах физики. Движение различных маятников продолжает привлекать к себе естествоиспытателей.

Физическим маятником называется твердое тело, обладающее горизонтальной осью, вокруг которой оно совершает качания (вращения, колебания) под действием своего веса. Положение маятника полностью определяется углом его отклонения  $\phi$  от положения равновесия, и поэтому для определения закона движения маятника достаточно найти зависимость этого угла от времени  $\phi = \phi(t)$ . Это уравнение зависит от начальных условий, то есть от угла и угловой скорости в момент времени  $t = 0$ . Выберем систему осей координат так, чтобы плоскость  $xOy$  проходила через центр тяжести тела и совпадала с плоскостью качания маятника, а ось  $z$  была направлена перпендикулярно этой плоскости. Тогда уравнение движения физического маятника запишем в виде  $J \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2} = M_z$ , где  $J$  – момент инерции маятника относительно его оси качания (вращения),  $M_z$  – момент силы, действующей на маятник. Этой силой является его вес  $P$ , момент которого относительно оси определяется выражением  $M_z = -Ph \sin\phi$ , где  $h$  – расстояние от оси вращения маятника до его центра масс. Таким образом, уравнение движения физического маятника:  $\frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{Ph}{J} \cdot \sin\phi = 0$ . Предельным случаем физического маятника является математический маятник, представляющий материальную точку, соединенную с горизонтальной осью, вокруг которой материальная точка качается, жестким невесомым стержнем длиной  $l$ . Тогда момент инерции этой точки относительно оси вращения равен  $J = Pl^2/g$ . Так как расстояние от центра тяжести математического маятника до оси равно  $h$ , то дифференциальное уравнение движения математического маятника можно написать в виде:  $\frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{g}{l} \cdot \sin\phi = 0$ . Уравнения движения физиче-

ского и математического маятников имеют один и тот же вид

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \omega^2 \cdot \sin \phi = 0, \quad (1)$$

где  $\omega^2 = P \cdot h / J = g / l$ .

Важно отметить, что особенностью рассмотренных физического и математического маятников является их движение в постоянном гравитационном поле, созданном массой планеты (в данном случае, Земли)  $M$  и радиусом планеты (Земли)  $R_0$ , существенно превышающими линейные размеры и массу маятников. В дальнейшем мы постараемся решить задачу, когда масса и радиус планеты сравнимы с массой и размерами маятника, то есть в случае, когда гравитационное поле нельзя считать постоянным, а гравитационная сила описывается законом всемирного тяготения Ньютона  $F = \gamma m M / r^2$ , где  $\gamma$  – гравитационная постоянная,  $r$  – расстояние от центра планеты (Земли) до центра тяжести тела массой  $m$ .

Рассмотрим сначала движение маятника в постоянном гравитационном поле (рис. 1), при этом будем различать тяжелую  $m_t$  и инертную  $m_i$  массы колеблющегося тела. Согласно зако-

ну Ньютона, сила тяжести (или вес тела)  $P = m_t g = \frac{m_t \gamma M}{(R_0 + l)^2}$ , а поскольку  $l \ll R_0$ , то ускорение

свободного падения на планете (Земле)  $g = \gamma M / R_0^2$ . Если маятник отклонить на угол  $\phi$ , то появится составляющая веса  $F = P \cdot \sin \phi$ , которая будет направлена перпендикулярно стержню и в результате действия которой, согласно второму закону Ньютона, возникнет ускорение  $a$ . Коэффициентом пропорциональности этой силы и ускорения будет инертная масса тела:  $F = m_i a$ .

Поскольку для кругового движения ускорение  $a = l \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2}$ , то получаем уравнение движения в виде (1), где квадрат радиальной частоты  $\omega^2 = m_t g / m_i l$ , а период колебаний маятника

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \sqrt{\frac{m_i}{m_t}}$$

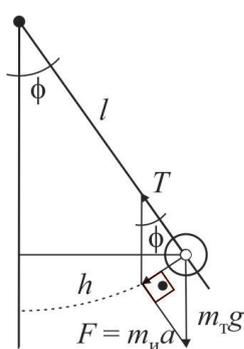


Рис. 1. Физический маятник

Обращаясь к истории физики, заметим, что первым ученым, кропотливо занимавшимся сравнением тяжелой и инертной масс, был, по-видимому, Галилео Галилей, который с помощью движения тел, падающих с Пензенской башни, показал, что отношение  $m_i / m_t$  есть величина постоянная, близкая к 1. Позднее Исаак Ньютон исследовал величины периодов маятников различной длины и массы и повысил точность равенства  $m_i / m_t$  и 1. опыты Генри Кавендиша и Роберта Этвеша еще более увеличили степень точности этого отношения, но тем не менее ученые сомневались в точном равенстве этих масс. Сомнения развеял Альберт Эйнштейн. Сто лет назад, начиная работать над своей общей теорией относительности, он равенство  $m_i = m_t$  обратил в незыблемый физический постулат.

В физике известны законы, внешне похожие на закон всемирного тяготения Ньютона. Закон взаимодействия так называемых магнитных зарядов. Закон взаимодействия проводников с током и т. д. Самый известный – закон Шарля Кулона о взаимодействии электрических зарядов. Предположим, что достаточно большой положительный заряд  $Q$  равномерно распределен по поверхности сферы большого радиуса  $R_0$ , так что близко к его поверхности электрическое поле

заряда  $Q$  можно считать постоянным, а его напряженность  $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$  ( $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

Если рядом с поверхностью сферы на невесомом стержне длиной  $l$  поместить тело с отрицательным зарядом  $q$ , то после отклонения от положения равновесия тело начнет колебаться и мы также получим маятник, который можно назвать электрическим.

Постоянное электрическое поле можно создать с помощью двух плоских параллельных разноименно заряженных пластин (рис. 2). Поскольку выражения для законов Ньютона и Кулона похожи и описываемые в них силы относятся к центральным силам, то уравнение колебаний электрического маятника в постоянном электрическом поле будет таким же, как и уравнение движения физического маятника в гравитационном поле. Если напряженность постоянного электрического поля равна  $E$ , то выражение для квадрата частоты имеет вид  $\omega^2 = qE/m_{\text{н}} l$ .

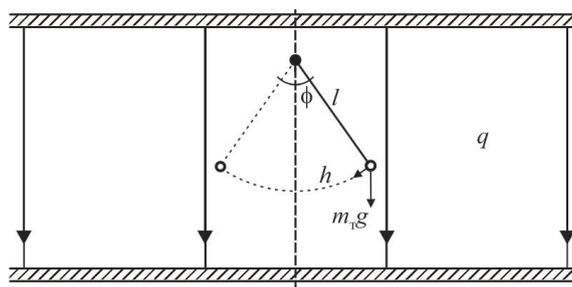


Рис. 2. Электрический маятник

Учет гравитационного поля Земли приводит к тому, что квадрат частоты колебания массивного наэлектризованного тела будет равен сумме электрической и гравитационной составляющих:

$\omega^2 = \frac{m_{\text{г}} g}{m_{\text{н}} l} + \frac{qE}{m_{\text{н}} l}$ . С помощью этого выражения можно определить не только отношение масс, но и отдельно значения для тяжелой и инертной масс маятника. В частности, если измерить два значения круговой частоты ( $\omega_1, \omega_2$ ) для двух напряженностей электрического поля ( $E_1, E_2$ ), тогда из системы двух уравнений для квадрата частоты получим выражения:

$$m_{\text{н}} = \frac{q(E_2 - E_1)}{l(\omega_2^2 - \omega_1^2)}, \quad m_{\text{г}} = \frac{q(E_2 \omega_1^2 - E_1 \omega_2^2)}{g(\omega_2^2 - \omega_1^2)}. \quad (2)$$

Вернемся к уравнению (1). Умножим его на производную угла  $\frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2} + \omega^2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot \sin\phi = 0$ , затем проинтегрируем  $\left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 - \omega^2 \cdot \cos\phi = C_1 \right)$  и определим  $C_1$  из начальных условий ( $t = 0, \phi = \phi_0, (d\phi/dt)_0 = 0$ ). В результате находим решение уравнения:

$$\left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 = 2\omega^2 (\cos\phi - \cos\phi_0). \quad (3)$$

При движении маятника его угол изменяется в диапазоне  $-\phi_0 \leq \phi \leq \phi_0$ . При  $\phi = \phi_0$  угловая скорость маятника обращается в нуль, далее угол  $\phi$  начинает уменьшаться. Когда угол достигает значения  $\phi = -\phi_0$ , угловая скорость маятника вновь обратится в нуль, затем угол  $\phi$  начнет увеличиваться до значения  $\phi = \phi_0$ . Таким образом, маятник будет совершать колебательные движения. Освобождаясь от квадратичной зависимости в (3) и интегрируя полученное уравнение, находим

$$t = \pm \frac{1}{\omega} \cdot \int \frac{d\phi}{\sqrt{2(\cos\phi - \cos\phi_0)}} + C.$$

Проводя отсчет времени от положения маятника  $\phi = \phi_0$  и преобразуя тригонометрическое подинтегральное выражение, получим эллиптический интеграл первого рода

$$t = \pm \frac{1}{2\omega} \cdot \int_{\phi_0}^{\phi} \frac{d\phi'}{\sqrt{\sin^2(\frac{\phi_0}{2}) - \sin^2(\frac{\phi'}{2})}}.$$

Обращение его относительно верхнего предела представляет уравнение движения маятника  $\phi = \phi(t, \phi_0)$ . Это известная эллиптическая функция Якоби. Период маятника  $T$  (время одного полного колебания маятника) определяется полным эллиптическим интегралом первого рода, значения которого даются специальными таблицами

$$T = \frac{4}{\omega} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha}{\sqrt{1 - \sin^2(\frac{\phi_0}{2}) \cdot \sin^2 \alpha}}. \tag{4}$$

Общее решение движения математического маятника при малых углах  $\phi$  имеет вид  $\phi = A \cdot \cos(\omega t + \phi_0)$  и является периодической функцией от времени. Это уравнение описывает колебательное движение с амплитудой  $A$  и периодом  $T = 2\pi/\omega$ , который не зависит от начальных условий. Это свойство малых колебаний называется изохронностью, оно используется в часах, где, благодаря изохронности, обеспечивается точность хода.

Рассмотренные движения физического и электрического маятников относились к случаям постоянных гравитационного и электрического полей. Рассмотрим теперь движения маятников в центральных (непостоянных) полях, когда радиус  $R_0$  сравним с длиной стержня  $l$  (рис. 3).

Для электрического маятника сила Кулона  $F_k = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ , сила инерции Ньютона  $F = F_k \cos\gamma$ , угол

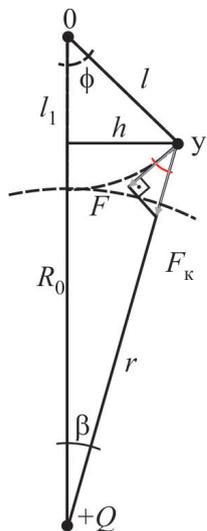


Рис. 3. Электрический маятник в поле центральных сил

$\gamma = \pi/2 - (\phi + \beta)$ ,  $\cos\gamma = \sin(\phi + \beta) = \sin\phi \cdot (R_0 + l)/r$ ,  $l_1 = l \cdot \cos\phi$ ,  $h = l \cdot \sin\phi$ ,  $r^2 = (R_0 + l)^2 + l^2 - 2l(R_0 + l) \cdot \cos\phi$ . После несложных преобразований приходим к уравнению движения

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \omega_0^2 \frac{\sin\phi}{(b - \cos\phi)^{\frac{3}{2}}} = 0, \tag{5}$$

где  $b = \frac{(1+a)^2 + a^2}{2a(1+a)}$ ,  $\omega_0^2 = \omega^2 \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot \sqrt{a(1+a)}}$ ,  $\omega^2 = \frac{qE}{m_{\text{н}} l}$ ,  $a = \frac{l}{R_0}$ .

При  $a \ll 1$  коэффициент  $b = 1/(2a)$ , а квадрат частоты  $\omega_0^2 = \omega^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a^{\frac{3}{2}}}$ , так что отношение  $\frac{\omega_0^2}{b^{\frac{3}{2}}} = \frac{qE}{m_{\text{н}} l} = \omega^2$  и мы получаем уравнение движения электрического маятника в постоянном электрическом поле.

Преобразуя и интегрируя уравнение (5), так же, как мы поступали с уравнением (1), приходим к уравнению

$$\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 = 4\omega_0^2 \left( \frac{1}{\sqrt{b - \cos\phi_0}} - \frac{1}{\sqrt{b - \cos\phi}} \right), \quad (6)$$

которое сложнее уравнения (3), и тем не менее можно найти и для него уравнение движения. Введем угол  $\psi$  из условия  $\cos\psi = \frac{\cos\phi}{b}$ , тогда  $\sqrt{b - \cos\phi} = \sqrt{b} \cdot \sqrt{1 - \cos\psi} = \sqrt{2b} \sin \frac{\psi}{2}$ . Полагая  $\alpha = \sin \frac{\psi}{2}$  и  $\alpha_0 = \sin \frac{\psi_0}{2}$ , решение (6) получим в виде интеграла

$$\int_0^{\alpha_0} \frac{\alpha^{\frac{3}{2}} \cdot d\alpha}{\sqrt{(\alpha - \alpha_0) \cdot \left[ \alpha_1^2 - \left( \alpha^2 - \frac{1}{2} \right)^2 \right]}} = \frac{\omega_0 t}{\sqrt[4]{b} \cdot \sqrt{\alpha_0}} + C_1,$$

где  $\alpha_1 = 1/(2b)$ .

Таким образом, период колебаний электрического маятника в поле центральных электрических сил, подобно (4), будет равен

$$T = \frac{2 \cdot \sqrt[4]{b} \cdot \sqrt{\alpha_0}}{\omega_0} \cdot \int_0^{\alpha_0} \frac{\alpha^{\frac{3}{2}} \cdot d\alpha}{\sqrt{(\alpha - \alpha_0) \cdot \left[ \frac{1}{4b^2} - \left( \alpha^2 - \frac{1}{2} \right)^2 \right]}}.$$

Статья поступила 2 апреля 2019 г.

### НОВЫЕ КНИГИ

КОМАРОВ И. В., СМОЛЬСКИЙ С. М. **Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний.** – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 392 с.: ил.

Рассмотрены основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением и с частотной модуляцией колебаний (ЧМ РЛС), а также основы теории задающих генераторов ЧМ РЛС и излучающих ЧМ-автодинов. Такие системы используются для самых разнообразных целей, но наиболее широкое применение они нашли в системах ближнего действия при расстояниях между взаимодействующими объектами от крайне небольших до нескольких километров.

Книга предназначена для научных работников и специалистов, знакомых с принципами действия радиолокационных систем и желающих изучить основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением и с частотной модуляцией колебаний, а также для специалистов, занимающихся теорией автоколебательных систем, в частности, автодинного типа. Издание будет полезно аспирантам и студентам старших курсов при изучении указанных вопросов.

# ИСТОРИЯ

УДК 621.38(09)

## НЕТ ПРЕДЕЛА ИСКАНИЙ УМУ (интервью с В. Г. Калиной)

**А. К. Балыко**

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

## THERE IS NO LIMIT FOR THE SEEKING MIND (interview with V.G. Kalina)

**A.K. Balyko**

*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*



Валентин Георгиевич Калина

Валентин Георгиевич Калина – старейший «истоковец», доктор технических наук, ветеран труда, в разные годы возглавлявший два научно-производственных комплекса и три научно-технических лаборатории, у истоков которых он стоял; человек с обширными научными интересами и судьбой, созданной каждодневным упорным трудом. Из пятитысячного коллектива «Истока» лишь немногие могут вспомнить сегодня фамилию Калина, а между тем Валентин Георгиевич практически ежедневно пересекает проходную родного предприятия, с помощью современных компьютеров решает сложные научные задачи, активно участвует в обсуждении полученных результатов, практически в каждом выпуске нашего родного научно-технического сборника «СВЧ-техника» публикует статьи по самым передовым разделам электронной техники, не пропускает ни одного заседания диссертационного совета при АО «НПП «Исток» им. Шокина» по присуждению кандидатских и докторских званий, членом которого он является почти 50 лет. В. Г. Калина награ-

жден юбилейной медалью «75 лет АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Вне всякого сомнения, Валентин Георгиевич Калина является ярчайшим примером жизненного и научного долголетия для многих поколений «истоковцев» и фрязинцев. После таких вводных слов, многие читатели захотят узнать о славном ученом «Истока».

– *Валентин Георгиевич, хочу Вам высказать огромную признательность за то, что Вы согласились рассказать о своих родных, о себе и о своем творчестве. Наверное, это едва ли не первый публичный разговор с Вами. Начну с традиционного вопроса. Расскажите о своих родителях.*

– Если бы Вы задали такой вопрос лет сорок назад, то получили бы простой, традиционный ответ советского человека: «Мои родители были советскими служащими». Хотя, конечно же, знал о тех деяниях, каким были подвергнуты мои родные со стороны государства. Время изменило не только формуляцию общества, но и нас самих, потому прошу извинить меня за многословность ответа.

Родился 8 августа 1926 года в городе Ленинграде, в семье Георгия Платоновича Калины (03.05.1902 – 30.10.1990 гг.) и Наталии Владимировны Манасеиной (11.12.1907 – 31.10.1994 гг.).

Мама. Красавица известного рода Манасеиных. Заботилась обо мне в подавляющие 1937 – 1939 годы, в годы войны, моей учебы, моего отрочества. Отец моей мамы, Владимир Сергеевич Манасеин (1878 – 1938 гг.), получил военно-инженерное и юридическое образование, историк права, магистр. Преподавал в университете Иркутска, на кафедре истории права (1925 – 1930 гг.).

Активно занимался краеведением, оставил большое число научных работ, которые хранятся в фонде Иркутского университета и Государственном фонде Иркутской области. Весной 1937 г. был арестован, приговорен к расстрелу, умер, как сказали, в тюрьме, за день до назначенного приговора.

Исход родословной отца – село Носовка (Черниговская губерния). Мой дед – Платон Хрисанфович Калина, инженер-железнодорожник, увлекался передовой техникой. От него мне остались игрушки: генератор Рентген-лучей, трубка Крукса, к ней – генератор высоковольтного напряжения, катушка Румкорфа с огромным многослойным конденсатором, также промытые и высушенные кислотные аккумуляторы, источник низковольтного питания катушки. Трубку Крукса не трогал – мне пояснили, что она вакуумирована и может взорваться. Катушку Румкорфа и аккумуляторы мальчишка лет 5...8 детально «изучал», привёл в негодность. Принципы их действия мне стали известны лишь лет в 11. Жёстко корил себя за то, что испортил технику, уже не мог привести её в действие.

Мой отец Георгий Платонович – известный советский микробиолог, доктор медицинских наук, профессор. В студенческие годы занимался научной работой на кафедре бактериологии медицинского факультета Иркутского университета и в лаборатории Иркутского противочумного центра. После окончания университета в 1925 г. заведовал санитарно-гигиенической лабораторией Забайкальской железной дороги. Работал по специальности микробиолога в Хабаровске, Чите, на станции Зима. В 1928 г. закончил аспирантуру при кафедре бактериологии 1 Ленинградского медицинского института, затем возглавил чумной отдел в Узбекском санитарно-бактериологическом институте. Участвовал в ликвидации вспышки легочной чумы в Центральном Тянь-Шане и обследовании чумных очагов в Кызыл-Кумах и южной Киргизии. В 1933 – 1936 гг. работал заведующим кафедрой микробиологии Архангельского санитарно-бактериологического института. Заложил в стране основы нормированного потребления воды в промышленных масштабах, впервые обосновал необходимость строительства очистных сооружений. В 1935 году, спустя 10 лет после окончания университета, защитил на учёном совете 1 Ленинградского медицинского института диссертацию доктора медицинских наук. В 1936 г. по конкурсу избран на должность заведующего кафедрой микробиологии в Винницком медицинском институте. Автор свыше 200 научных трудов, шести основополагающих монографий и восьми патентов на изобретения по микробиологии. Руководил джаз-оркестром из студентов института.

Отдыхая, играл классические произведения на домашнем рояле. В августе 1938 г. был арестован (потом узнали – был приговорён к расстрелу, как японский шпион!). Жилую комнату опечатали. Я жил в прихожей. Вторая жена папы стала жить у знакомых и попросила маму забрать меня. Затем поехала в Москву, к всемогущему генеральному прокурору Вышинскому... В декабре 1939 г. папу освободили.

В 1941 г. Георгий Платонович добровольцем ушел на фронт. Руководил противоэпидемической службой Советской Армии в битвах под Москвой, Ленинградом, Выборгом и в других операциях. В условиях боевой обстановки участвовал в противоэпидемическом обеспечении войск Прибалтийского фронта. Награждён орденами Красной Звезды и Отечественной войны II степени, рядом медалей. Начав войну в звании лейтенанта, закончил – в звании подполковника.

**– Во всех рассказах о Вашем отце, ученом, преподавателе, музыканте, затронут целый период истории нашей страны, в которой мы родились и жили и которой Вы отдали лучшие годы своей научной и производственной деятельности. А с чего начался Ваш интерес к науке?**

– Как сейчас понимаю, в моей жизни, как и родителей, было много необычного, начиная с катушки Румкорфа. Большой интерес я проявлял к бактериям, к лабораторной работе папы. Мальчишкой я пытался узнать, что внутри электрона, понять, где границы Мира, что за этими



Курсант ОВМУ, 1950 г.

границами, за границами границ... Расспросить было некого, хотя папа и мама, несмотря на большую занятость и жизненные невзгоды, уделяли мне внимание. Долго жил с папой в Архангельске и Виннице, а после ареста папы – с мамой в Одессе. Во время войны – в других городах, например в Батуми, куда было вынуждено переехать Управление Черноморского пароходства, где работал мой отчим.

В конце войны специалисты были нужны в короткие сроки. Разрешалось начинать учиться в высшем учебном заведении, не закончив последние классы школы. Так я поступил на электромеханический факультет военизированного Одесского высшего мореходного училища (ОВМУ), где была ходьба в строю, жизнь в казарме. Помимо высшего образования, прошел обширную практику плавания на морских судах, до Англии и Америки, через Атлантический океан.

В 1950 году закончил ОВМУ по специальности «Судовые радиоустановки и устройства», получив квалификацию радиоинженера и звание младшего

лейтенанта. Был распределен в торговый морской порт г. Николаева, где в 1951 – 1954 гг. прошел путь от старшего техника до начальника радиостанции и начальника участка связи. Здесь ясно ощутил роль техники связи в жизни людей. Захотелось не только управлять связью, но и создавать новую аппаратуру.

Мой товарищ предложил мне поехать в Москву, стать аспирантом в каком-нибудь НИИ по интересующей тематике. Мы поехали, считая, что «молодым везде у нас дорога», нас ждут

с нетерпением. Побродив в Москве по известным институтам и повсеместно получив отказы, мы на свое счастье узнали, что в поселке Фрязино несколько лет тому назад создали НИИ, куда требуются молодые специалисты. Поселок располагался недалеко от Москвы, и мы двинулись в путь. В НИИ-160 нас встретили очень доброжелательно. С нами разговаривали ученые Н. Д. Девятков и В. С. Лукошков, о которых мы, к своему стыду, никогда до этого не слышали. Так в 1954 г. я был зачислен в отдел 140, который сейчас именуется НПК-2. В том же году я поступил в аспирантуру при НИИ-160.

**– А кто был вашим научным руководителем в аспирантуре?**

– Анатолий Павлович Федосеев. После его отъезда на Запад он надолго был отторгнут от советской электроники, и «истоковцы» мало о нем знают. Расскажу, что мне запомнилось. Приветливость и внимание к сотрудникам, особо к начинающим специалистам; введение их в курс дела; помощь с первых шагов, несмотря на высокую свою загруженность; тщательное обсуждение вопросов; настойчивая требовательность. Анатолий Павлович был подвижен, интенсивен, в кабинет врывается почти бегом. В отделе, которым руководил А. П. Федосеев, сформировались видные учёные-практики «Истока» Л. А. Ривлин и Э. А. Гельвич, а в последующие годы и многие другие.

А. П. Федосеевым было высказано блестящее предложение по созданию прибора сверхвысокой мощности – усовершенствованного магнетрона – в виде высокой башни, с изменённым направлением потока электронов. Эту идею, насколько знаю (всё было сверхсекретно), раскритиковали. Хотя на заседании НТС предприятия с приглашёнными специалистами А. П. Федосеев доложил не только идею, но и результаты испытаний макета прибора. В итоге автор перспективных идей, блестящий специалист-электронщик в ходе зарубежной командировки в Париж в 1971 г. покинул Родину в поисках реализации своих технических замыслов. За рубежом, как говорили, он также не смог воплотить свои идеи, поскольку там были свои специалисты. Генераторы высокого уровня мощности СВЧ они создавали на основе традиционных клистронов.

Как аспиранту, сотрудничать с Анатолием Павловичем мне довелось очень короткое время. Один из работников его отдела, инженер, которого номинировали как истинного изобретателя магнетрона, заявил А. П. Федосееву (только ли ему?), что человек, пришедший в аспирантуру НИИ-160 «со стороны», после работы на радиостанции морского порта, особенно после плавания в Америку, подозрителен и не имел никакого права присутствовать на упомянутом заседании НТС. «Такой человек не должен быть в составе подразделения, где идут секретные разработки, вообще не должен работать в НИИ-160» – так мне неофициально пояснили в службах института. А. П. Федосееву удалось убедить руководство перевести меня в менее секретное подразделение – инженером в отдел измерений 120. Он защитил меня от увольнения.



Аспирант В. Г. Калина



Вечер в лаборатории СВЧ-измерений

**– И как же сложилась Ваша дальнейшая судьба?**

– В НИИ-160 прошли очередные преобразования, в результате была создана новая лаборатория – «холодных» СВЧ-измерений. Она входила в отдел 120, но подчинялась лично директору, поскольку холодные измерения требовались сразу многим подразделениям. Перед лабораторией была поставлена непростая задача – централизовать холодные СВЧ-измерения и обеспечить их надёжный контроль во всех разрабатывающих подразделениях и цехах опытного завода. В должности начальника новой лаборатории утвердили меня.

Прежде всего, нами были созданы, согласованы с подразделениями, отделом технического контроля, военной приемкой и утверждены руководством НИИ несколько базовых методик холодных СВЧ-измерений. Согласно этим методикам, собрана, отлажена и поверена необходимая измерительная аппаратура. Найден и обучен персонал. Руководство НИИ утвердило сроки и порядок регулярной поверки опорных узлов измерительной аппаратуры, применяемой в разрабатывающих и выпускающих подразделениях. Причем, что важно, в практику введена систематическая поверка контрольных узлов установок измерения параметров разрабатываемых и выпускаемых СВЧ-приборов (ослабителей, фазовращателей, нагрузок трактов высокого и низкого уровней мощности, волномеров, вторичных эталонов спектральной мощности шумовых сигналов СВЧ и др.). Благодаря руководству НИИ, налажено систематическое обновление применяемых комплексов измерительной аппаратуры и поверка их состояния во внешних контрольных организациях. Установлена ответственность персонала за выдачу достоверных результатов измерений. Одним словом, административной и хозяйственной работы у меня было много. Тем не менее, аспирантскую и научную деятельность я вел довольно активно. В частности, мной была разработана уникальная установка для «горячих» измерений нагрузочных характеристик магнетронных СВЧ-генераторов. На ее основе в конце 1958 г. защитил в диссертационном совете НИИ-160 диссертацию кандидата технических наук по теме

«Измерение параметров магнетронов СВЧ», где изложил разработанные мной оригинальные теории и методики измерений, а также полученные результаты экспериментальных исследований магнетронов.

– **И долго Вы продолжали работать в этом направлении?**

– Работая начальником лаборатории измерений, заинтересовался новым видом СВЧ-устройств, на основе необычных в то время керамических материалов – ферритов. В 1957 – 1959 гг. в научно-техническом сборнике «Электроника СВЧ» опубликовал статьи, посвященные новым видам СВЧ-устройств – ферритовым волноводным вентилям, широкополосным ферритовым модуляторам. А после защиты диссертации начал убеждать руководство НИИ в перспективности этого направления для СВЧ-электроники.

В начале 60-х годов дирекция определила создание нового подразделения в секторе № 50 (позднее отделе 190) – лабораторию ферритовых устройств. В должности начальника лаборатории утвердили меня. В это же время решением ВАК от 20 июня 1963 г. был утверждён в учёном звании старшего научного сотрудника по специальности «Сверхвысокочастотная электроника». По моей инициативе отдел 190 начал изготавливать новые для предприятия СВЧ-материалы: магнитомягкие ферриты и монокристаллы железо-иттриевого граната (ЖИГ). В ходе работ предложил и защитил авторскими свидетельствами на изобретения два вида волноводных ферритовых вентиляей на основе ферромагнитного резонанса. Замечу, в те годы ферритовые вентили только начинали выпускаться зарубежными фирмами. Совместно с изготовителями ферритов и магнитов нами был сделан настоящий прорыв в этой области – для разрабатывающих подразделений НИИ и опытного завода впервые было изготовлено свыше 800 ферритовых вентиляей. Применение вентиляей упростило и повысило точность измерения параметров СВЧ ЭВП в отделениях и цехах опытного завода. По материалам работ, выполненных в НИИ-160, был подготовлен промышленный выпуск феррорезонансных вентиляей на предприятиях Министерства электронной промышленности СССР: НИИ МД (г. Ленинград) и ГНИПИ (г. Горький), начат серийный выпуск данных вентиляей Ростовским приборостроительным заводом. Было также разработано, исследовано и внедрено в практику измерений оригинальное ферритовое устройство – микромодулятор амплитуды и фазы СВЧ-сигнала – генератор опорного сигнала для калибровки установок измерения амплитудных и фазовых шумов сигнала СВЧ-генераторов и усилителей. Установки измерения шумов СВЧ-приборов лишь начинали выпускаться за рубежом, для нас они были практически недоступными. В ходе работ разработал оригинальную теорию и методику расчёта нерегулярных волноводных систем, включая ферритовые устройства на пластинах и ЖИГ-сферах. Изменение электромагнитного поля вдоль нерегулярного волновода, трансформация групп волн определяются решением дифференциального уравнения многомодовой матрицы передачи.

По этой объемной работе в 1968 г. в диссертационном совете (ДС) НИИ-160 мной была защищена диссертация доктора технических наук по теме «СВЧ-устройства с ферритовыми резонаторами (основы расчёта и принципы действия)».

***Удивительно, всего за 14 лет Вы прошли научный путь от инженера до доктора технических наук. А дальше у Вас была столь же плодотворная деятельность?***

– Начну с того, что, бесспорно, производственными успехами я обязан работе творческих коллективов моих лабораторий. Обо всех сотрудниках в ограниченном интервью рассказать невозможно. Назову некоторых, преимущественно молодых ученых, научным руководителем



Сектор № 50, шестой слева в нижнем ряду – В. Г. Калина

которых я был во время их учебы в аспирантуре. В. Н. Буданов и С. В. Верба после окончания аспирантуры отлично защитили диссертации в ДС «Истока» и стали кандидатами технических наук. Я не случайно не раз упоминаю ДС «Истока», поскольку мой почти 50-летний опыт работы в нем показывает, что уровень требований для соискателей в нашем ДС выше, чем в любом известном мне совете аналогичных специальностей, защититься в нем очень непросто. Хочу отметить еще одного моего аспиранта – С. В. Белякова, который работал в НПК-5 и занимался исследованием различных устройств на ЖИГ-сфере. Он был очень талантливым и плодотворно работающим молодым ученым. Число его публикаций в научных журналах превышает 150. Кроме того, он 5 лет возглавлял Совет молодых специалистов «Истока». К большому моему сожалению, Сергей Васильевич не довел свою работу до защиты диссертации. Он трагически погиб.

**– Кроме того, Вы возглавляли крупное подразделение «Истока», которое занималось нетрадиционной для нашего предприятия тематикой?**

– После открытия сотрудниками нашего НИИ нового физического явления в полупроводниках и создания на его основе лавинно-пролетных диодов (ЛПД) активный молодой директор НИИ-160 С. И. Ребров в 1966 г. принял решение образовать на предприятии новую структурную единицу – отдел 330. Начальником отдела был назначен С. А. Перегонов, а научным руководителем – соавтор открытия, ученый-теоретик А. С. Тагер. Основная задача отдела состояла в создании и освоении технологии полупроводниковых диодов, разработке диодов СВЧ (ЛПД, варакторов,  $p-i-n$ -диодов), генераторов на их основе, а также СВЧ-узлов и аппаратуры. Однако еще в 1954 году в Москве был образован НИИ-35 (НИИ «Пульсар»), который занимался разработкой полупроводниковых приборов, куда, в частности, из нашего предприятия перешел А. В. Красилов, известный тем, что в НИИ-160 первым в СССР разработал биполярный транзистор. Интересы двух предприятий МЭП СССР постоянно сталкивались. Кроме того, А. С. Тагер больше тяготел к теоретическим изысканиям, а С. А. Перегонова тянуло к системной разработке радиолокационной аппаратуры. В конце концов это перевесило, и он был назначен руководителем другого подразделения. В то же время защитой докторской диссертации в 1968 году я, видимо, привлек к себе внимание С. И. Реброва, и он предложил мне, не по профилю моей научной работы, возглавить сектор 4, созданный на базе отдела 330. От сектора требовалось, в частности, организовать серийный выпуск СВЧ-диодов на существующей производственной базе. Задача оказалась не из легких. Мне, новому руководителю, пришлось отложить научную работу в области ферритовой техники, начать изучать работу полупроводников и технологические процессы их изготовления. Коллектив сектора был собран из сотрудников других отделов НИИ. Многолетней устойчивой базы знаний, как основы коллектива, ещё не было. Случались неурядицы, как производственного, так и социального характера. В 1972 г. произошла очередная реорганизация. А. С. Тагер вернулся в свой родной теоретический отдел, руководителем отделения 4 был назначен Г. А. Крысов. В научном плане этот период моей деятельности был наименее плодотворным, хотя работа в новом направлении позволила мне получить задел в ранее неизвестной области.

**– И Вы занялись педагогической деятельностью?**

– Да, решил попробовать себя в новой, преподавательской деятельности в Московском институте электронного машиностроения (МИЭМ), где мне предложили возглавить кафедру и должность профессора. Здесь я приобрел новый опыт, обобщил знания по теории и технике СВЧ. В частности, работая со студентами, изучил работу на Универсальных ЭВМ, что впоследствии помогло легко освоить работу на персональных компьютерах.

В середине 70-х годов массовое движение получил переход сотрудников «Истока» в НИИ «Циклон». Мне предложили там место начальника отдела (отделения), и я согласился, тем более, что это предприятие было образовано на основе «истоковского» центрального бюро применения СВЧ-приборов. С сотрудниками отдела мы выполнили ряд тем по исследованию путей повышения качества и надежности гибридно-интегральных модулей СВЧ, методов построения микрополосковых модулей, получили 5 авторских свидетельств на изобретения.

– **Тем не менее, Вы вернулись на «Исток»?**

– Да, после нескольких лет работы вне «Истока», в 1980 г. принял решение вернуться на родное предприятие. Немалую роль в этом сыграл С. П. Кантюк, начальник НПК-8, который при случайной встрече предложил мне возглавить лабораторию гибридно-интегральных устройств защиты приёмных устройств СВЧ радиолокаторов от мощных сигналов. Вместе со своими сотрудниками мы провели ряд актуальных НИР и ОКР по разработке защитных устройств на полупроводниковых приборах и узлов ГИС СВЧ.

– **Вы продолжали научную работу в это время?**

– Конечно. Исследовал перспективные для гибридно-интегральных устройств СВЧ-тракты и основанные на них защитные устройства. Надо сказать, что за годы работы мной и с моим участием опубликовано немало статей. В кратком интервью перечислить их невозможно. Во время работы в области защитных устройств (1980 – 2009 гг.) опубликовано 20 статей по расчёту диэлектрических потерь в экранированных микрополосковых и ленточных линиях передачи; аппроксимации затухания в проводниках микрополосковой и ленточной линий передачи; расчёту зазора между микрополосковой линией и крышкой экранирующего корпуса; ленточных широкополосных переходов между линиями передачи, проводники которых лежат по разные стороны СВЧ-платы; миниатюризации микрополосковых линий; расчёту параметров миниатюризированной линии; определению резонансных колебаний корпуса с микрополосковой платой; исследованию принципа действия кольцевых симметричных мостов, балансных делителей на планарных линиях передачи с  $T$ - и  $TE$ -волной и противофазных и квадратурных делителей на  $E$ - и  $H$ -мостах, планарных  $E$ - и  $H$ -мостов и делителей с полу-волновым несвязанным кольцом, компактных  $E$ - и  $H$ -мостов и делителей с планарным сжатым кольцом, топологии делителей, расчёту планарных кольцевых мостов и делителей; ленточных широкополосных переходов между линиями передачи, проводники которых лежат по разные стороны СВЧ-платы.

Кроме этих пассивных устройств, в соавторстве с В. В. Шаповаловой и Н. В. Ильичёвым были рассчитаны диодные защитные устройства с резонатором на связанных микрополосковых линиях, а в соавторстве с В. В. Шаповаловой разработана модель многоканального ограничителя мощности по критерию пробивного напряжения диодов.

В последние годы в должности ведущего научного сотрудника НПК-8 работаю над интересными задачами расчёта циклотронных защитных устройств (ЦЗУ) – входного звена приёмного устройства радиолокаторов. ЦЗУ, как известно, отличаются исключительным быстродействием, низким уровнем шума, высокой допустимой мощностью и позволяют существенно повысить дальность обнаружения целей. Мной построена оригинальная теория и разработана детальная методика аналитического инженерного расчёта секций ЦЗУ в виде полосовых фильтров. Методика расчёта успешно используется в текущих разработках ЦЗУ. С участием корифеев разработок Ю. А. Будзинского и С. В. Быковского теория и методика расчёта ЦЗУ опубликована в шести статьях научно-технического сборника «Электронная техника», сер. 1,

«СВЧ-техника». Шестая статья: «Циклотронное защитное устройство. Модель с заданной полосой пропускания» опубликована в сборнике №1 за 2019 год.

В настоящее время мной опубликованы 111 печатных работ, зарегистрированы 29 изобретений, на которые получены авторские свидетельства и патенты, изданы 14 отчётов по НИР и ОКР. Я член ДС НИИ «Исток» с 1971 г. по настоящее время, был членом ДС МИЭМ с 1972 по 1978 г.

– **Как Вы охарактеризовали бы свой научный стиль и область интересов?**

– Область моих интересов – разработка методик расчёта и методик измерений СВЧ-устройств, новых конструкций СВЧ-узлов и приборов. Научный стиль – максимально сжатое изложение работ.

– **Расскажите, пожалуйста, о Вашей семье.**

– Моя семья! Людмила Васильевна Гусева-Калина, жена (01.10.1925 – 03.09.2014). Моё второе, самостоятельное Я. В то давнее время, оставив дочку Олю на попечение мамы, самоотверженно выехала со мной в неизвестное ей Фрязино. В общей комнате общежития, где было ещё 7 жильцов, нам дали одну койку. Инженер-строитель, много лет отдала «Истоку». Спасибо ей за вместе пройденные 65 лет, за жизненную поддержку, мудрость, терпение. Светлая ей память, и так горько, что ее уже нет...

Талантливая дочка Оленька, кандидат медицинских наук, самоотверженно воспитывает моего правнука Игоря, заботится обо мне.

Приветливые и заботливые внушки Ирочка и Леночка отчаянно погружены в работу, с утра до позднего вечера.

Правнук Игорёк – просто молодец! Неоднократный лауреат первой степени на международных и всероссийских конкурсах в номинации «Художественное слово». 17 февраля 2019 года на Международном фестивале-конкурсе «Огни большого города» Игорь получил Гран-При, награжден хрустальным кубком.

Духовно и материально мы помогаем друг другу. Вижу с детьми каждый вечер.

Годы проходят удивительно быстро.

Благодарю родной наш журнал, который позволил немного рассказать о том, что окружало меня в жизни и работе.

*Статья поступила 28 февраля 2019 г.*

**ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ  
НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ  
«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»**

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в “Редакторе формул” Word. Непосредственно в программе Word допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение не менее 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками \*.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

## ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2019 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 7200 руб., включая НДС (20 %). Издается в цветном варианте.

*Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).*

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 774550001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

### ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник "Электронная техника", серия 1, "СВЧ-техника" на 2019 г. и направлять по адресу:

Куда \_\_\_\_\_  
(почтовый индекс, адрес)

Кому \_\_\_\_\_  
(название организации)

Заказ оплачен платежным поручением № \_\_\_\_\_ дата \_\_\_\_\_  
на сумму \_\_\_\_\_ за \_\_\_\_\_ экз.

## ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.  
Переводчик Барабанова Л.В.  
Компьютерная верстка Земскова Л.А.  
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 14.06.2019 г.  
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"  
г. Москва

Усл. п. л. 13,0  
Уч.-изд. л. 13,5  
Индекс 36292

Формат 60×88<sup>1/8</sup>  
Тираж 500  
14 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а,  
корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12  
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru



**Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2019, вып. 2 (541), с. 106**

**Подписной индекс 36292  
в каталоге агентства «Роспечать»**

