



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (558)

2023

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2(558)

2023

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. **В.М. Исаев**;
д.т.н. **П.В. Куприянов**; д.т.н. **Н.А. Лябин**;
д.ф.-м.н. **С.П. Морев**; 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;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
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 «Микроволновые системы», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.э.н. **М.В. Чекаданова**, ОЭЗ ТВТ «Исток», г. Фрязино;
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», 2023 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 2(558)

2023

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. **V.M. Isaev**;
D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**;
D.Ph.M.Sc. **S.P. Morev**, 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;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, IPh SB RAS, Novosibirsk;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;
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 «Microwave systems», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.E.Sc. **M.V. Chekadanova**, SEZ TIT «Istok», Fryazino;
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 ПИ № 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», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Радиоэлектронные устройства

- Перегонов С.А., Криворучко В.И., Орлов Ю.А.* – ФАР для антенны-аппликатора радиотермографа органов тела человека..... 6

Электроракуумные приборы

- Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Акафьева Н.А.* – Исследование многочастотного четырехлучевого квазифрактального клистронного резонатора..... 23
- Столяров И.И.* – Динамическая имитационная модель перспективного квантового стандарта частоты для исследования взаимосвязи мощности сигнала возбуждения и выходных характеристик устройства..... 33

Технология и материаловедение

- Коломин В.М., Рыбкин В.Н., Карасёв Н.С., Смирнова А.А.* – Некоторые методики измерения свойств керамических материалов..... 43
- Васильев В.И., Дьяконова О.А., Насонов В.А.* – Согласующие плавные рупорные антенны миллиметрового диапазона длин волн..... 52

Твердотельная электроника

- Карпов С.Н.* – Методика прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов на их основе..... 61

Медицинская электроника

- Чеканов А.В., Щелконогов В.А., Баранова О.А., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Изучение механизма антиагрегантного действия микроволнового излучения..... 69

Экономика

- Шутов Д.Г., Александров В.Р.* – Алгоритм учета движения и восполнения материалов на предприятии радиоэлектронной отрасли..... 77

История

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Мы «истоковцы»..... 83

CONTENTS

Radioelectronic devices

- Peregonov S.A., Krivoruchko V.I., Orlov Yu.A.* – Phased array for applicate antenna of radiothermograph for human body organs..... 6

Electrovacuum devices

- Miroshnichenko A.Yu., Chernyshev M.A., Akafyeva N.A.* – Investigation of a multi-frequency four-beam quasi-fractal klystron resonator..... 23

- Stolyarov I.I.* – The dynamic simulation model of a promising quantum frequency standard for investigating the interconnection between the excitation signal power and the output characteristics of the device..... 33

Technology and material science

- Kolomin V.M., Rybkin V.N., Karasev N.S., Smirnova A.A.* – Some methods for measuring the properties of ceramic materials..... 43

- Vasilyev V.I., Dyakonova O.A., Nasonov V.A.* – Matching smooth horn antennas in the millimeter wavelength range..... 52

Solid-state electronics

- Karpov S.N.* – Method for predicting the characteristics of transistor GaAs-heterostructures and HEMTs transistors based on them..... 61

Medical electronics

- Chekanov A.V., Shchelkonogov V.A., Baranova O.A., Polnikov I.G., Kazarinov K.D.* – Study of the microwave radiation antiaggregation action mechanism..... 69

Economics

- Shutov D.G., Alexandrov V.R.* – Algorithm for accounting the movement and replenishment of materials at the enterprise of radioelectronic industry..... 77

History

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.* – We come from «Istok»..... 83

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.369.67: 616-71

ФАР ДЛЯ АНТЕННЫ-АПЛИКАТОРА РАДИОТЕРМОГРАФА ОРГАНОВ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

С. А. Перегонов, В. И. Криворучко, Ю. А. Орлов

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

Описан вариант моделирования фазированной антенной решётки (ФАР) формата 4×4 элемента для антенны-апликатора (антенны для контактных измерений) СВЧ-радиотермометра диапазона 3,4...3,8 ГГц в его медицинском применении, выполненной с сумматором сигналов, обеспечивающим фазировку луча в ближней зоне. Для улучшения согласования на границе антенна-тело, антенна конструктивно изготовлена в виде микрополосковой платы на подложке МСТ-50 (диэлектрическая постоянная $\epsilon = 50$) с расположенными на ней 16-ю гантелеобразными щелями и двухслойной распределённой микрополосковой суммирующей схемой, изготовленной на материале RO6010 ($\epsilon = 10,7$). Предполагалось, что такая конструкция обеспечит увеличение принимаемого сигнала теоретически в 16 раз относительно одноэлементной антенны, что должно обеспечить измерения на большей глубине и улучшение геометрического разрешения. Проведённый цикл компьютерного моделирования параметров ФАР подтвердил возможность создания антенны для антенны-апликатора с качественно лучшими характеристиками по глубине обнаружения и геометрической разрешающей способности границ температурной аномалии.

КС: радиотермометрия, антенные фазированные решётки, фокусировка поля в ближней зоне, щелевые антенны, микрополосковые антенны

PHASED ARRAY FOR APPLICATE ANTENNA OF RADIOTHERMOGRAPH FOR HUMAN BODY ORGANS

S. A. Peregonov, V. I. Krivoruchko, Yu. A. Orlov

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

The article describes a variant of phased array antenna (PAA) modeling for an applicate antenna (antenna for contact measurements) of a microwave radiothermometer in the range of 3.4...3.8 GHz in its medical application, made in the form of phased array antennas of 4×4 element format with a signal adder that provides beam phasing in the near field. To improve the matching at the antenna-body interface, the antenna is structurally made in the form of a microstrip board on a MCT-50 substrate with a dielectric constant $\epsilon = 50$ with 16 dumbbell-shaped slots located on it and a two-layer distributed microstrip summing circuit made on RO6010 material with a dielectric constant $\epsilon = 10.7$. It was assumed that such a design would provide a theoretical increase in the received signal by a factor of 16, relative to a single-element antenna, which should provide measurements at greater depths and improve geometric resolution. The conducted cycle of computer simulation of the phased array parameters confirmed the possibility of creating an antenna for an applicate antenna with qualitatively better characteristics in terms of detection depth and resolution of the temperature anomaly geometry.

Key words: radiothermometry, phased array antennas, field focusing in the near field, slot antennas, microstrip antennas

1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-радиотермометрия внутренних органов человека существует более 50 лет. Разработаны методики, аппаратура и программы для измерения температуры в органах живых организмов (печени, почках, молочных железах и др.), которые используются для ранней диагностики воспалительных процессов [1–18]. Ряд диссертаций [19–22] посвящен совершенствованию методов исследования и аппаратуры СВЧ-радиотермометрии.

Радиотермометр состоит из трёх основных частей: антенны-аппликатора (антенны, прикладываемой непосредственно к телу); радиометрического приёмника; вычислительно-индикаторного блока.

Антенна во многом определяет уровень принимаемого сигнала, диапазон частот, согласование сигналов на границе антенна-тело, помехоустойчивость и согласованность габаритов антенны с размерами обследуемого органа.

Антенна-аппликатор представляет собой антенное полотно (антенну) и может включать в себя датчики температуры, контакта и термостабилизатор.

Данная статья посвящена разработке и компьютерному моделированию антенны радиотермометра, выполненной в виде ФАР с целью фазировки луча в ближней зоне и, как следствие, улучшения чувствительности и разрешения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ФОРМУЛИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К АНТЕННЕ-АПЛИКАТОРУ

Человеческий организм – сложный объект для радиотермометрии из-за значительного различия электродинамических характеристик и слоистости структур частей тела.

Создать универсальную антенну в этом случае весьма сложно, если вообще возможно. Вероятно, целесообразно разрабатывать антенны, ориентированные на определённые группы органов.

Электромагнитные характеристики органов животного и растительного мира приведены в таблице.

Орган, слой	ϵ'	ϵ''	$\text{tg}\delta$	Источник
Кожа	38 – 42	12	0,34	[10]
Жировая ткань	5 – 6	0,5	0,1	[10]
Мышечная ткань	47 – 50	19	0,38	[10, 11, 19, 20]
Печень	47	14	0,3	[20]
Почки	50	19	0,38	[20]
Лёгкие	85 (на 1 ГГц) 25 (на 10 ГГц)	–	–	[11]
Серое вещество мозга	49 – 45	–	–	[10]
Белое вещество мозга	36 – 34,5	–	–	[10]
Опухолевая ткань	65	–	0,42	–
Свиной жир	3,2	0,23	0,09	[10]
Рыба (треска, судак)	44 – 52	–	0,37 – 0,39	[19]
Картофель	51 – 59	–	0,23 – 0,29	[19]
Яблоки	54 – 60	–	0,23 – 0,27	[19]
Вода	78 – 81	–	–	[14]

Из таблицы следует, что для значительной группы животных объектов, таких, как печень, почки, мышечная ткань, серое вещество мозга, и некоторых других, значение диэлектрической постоянной ϵ находится в пределах 44...60 единиц, а в среднем составляет 51 единицу.

При радиотермометрических обследованиях объектов на предмет обнаружения воспалительных процессов интерес представляет ряд получаемых характеристик, таких, как достижимая глубина обнаружения температурных аномалий; геометрическая разрешающая способность границ температурных аномалий; диапазон и точность измерения температур.

В свою очередь, каждый из этих параметров зависит от диапазона рабочих частот, параметров антенны, чувствительности радиометрического приёмника и системы обработки принятых сигналов.

Диапазон измеряемых температур в основном определяется радиотехнической частью радиотермометра, а вот точность в некоторой части зависит от антенны. Отличие температуры антенны от температуры тела, с которым она соприкасается, приводит к ошибкам, определяемым знаком разности температур. Для минимизации этой ошибки в антеннах-аппликаторах устанавливают датчик температуры тела и автоматическую систему подогрева антенны до температуры тела.

Второй источник возможных ошибок связан с плохим согласованием СВЧ-антенны с телом. Для минимизации этой ошибки необходимо совпадение электромагнитных характеристик тела и антенны, в частности диэлектрических постоянных тела и подложки, на которой изготовлена микрополосковая антенна.

При этом достижимая глубина обнаружения температурной аномалии будет определяться прежде всего коэффициентом усиления антенны, так как коэффициент шума радиометрических приёмников и качество программ обработки сигналов достигли высокой степени совершенства и прогресс в этой части близок к пределу.

Увеличение коэффициента усиления антенны неизбежно будет сопряжено с обужением диаграммы направленности антенны, формируемой в объёме тела, что улучшит отношение сигнал/шум и повысит разрешающую способность.

На основании вышесказанного, требования к антенне-аппликатору повышенной эффективности могут быть сформулированы в следующем виде:

- 1) превышение коэффициента усиления антенны относительно одноэлементной антенны – не менее 10 дБ;
- 2) рабочая частота – 3,6 ГГц при полосе не менее 400 МГц по уровню отражения минус 10 дБ, ($K_{СВН} < 2$);
- 3) диэлектрическая постоянная материала антенны – 50 единиц;
- 4) диаметр антенны – не более 50 мм;
- 5) обеспечение мер помехозащищённости.

Такая формулировка требования к коэффициенту усиления вызвана тем, что в реализованных или описанных образцах СВЧ-радиотермометров [19, 23] используются, как правило, одноэлементные антенны весьма разнообразных конструкций: волноводные круглые или прямоугольные, печатные щелевые, рамочные, спиральные, патч-элементы и др. [7, 8, 10, 19]. При этом коэффициент усиления в децибелах не указывается, а рассматриваются формы электромагнитных полей, которые они приобретают в исследуемом теле. Исходя из имеющихся данных, такие антенны формируют диаграммы направленности с шириной луча 90...120 град и коэффициентами усиления в среде без потерь на уровне 5...7 дБ, что обеспечивает глубину обнаружения температурной аномалии до 30...40 мм [19]. Увеличение коэффициента усиления антенны на 10 дБ позволит увеличить глубину обнаружения температурной аномалии.

Увеличения коэффициента усиления можно добиться за счёт использования многоэлементных антенн типа фазированных решёток. Такие решётки для радиотермометров описаны в нескольких статьях, но все известные авторам работы [24–27] выполнены на подложках с $\epsilon < 10$, что определяет их сравнительно большие габариты, неприемлемые для антенн-аппликаторов на частоте 3,6 ГГц.

В связи с тем, что потери распространения СВЧ-сигналов в теле зависят от частоты, глубина обнаружения температурной аномалии также является функцией от частоты. При этом чем выше частота, тем меньше достижимая глубина обнаружения, но выше разрешающая способность в определении распределения температур по площади исследуемого органа. Практически описаны исследования в диапазонах частот от сотен мегагерц до 5...10 ГГц.

Исходя из этого, нами выбрано среднее и наиболее часто используемое значение частоты – 3,6 ГГц.

В качестве материала подложки антенны была выбрана керамика МСТ-50 с $\epsilon = 50$ при добротности $Q = 4000$.

Допустимый максимальный диаметр антенны-аппликатора 50 мм является компромиссом между минимально достаточными электродинамическими параметрами антенны и её эргономическими характеристиками [19].

Помехозащищённость обеспечивается путём хорошего согласования антенны с телом, обустройством ширины диаграммы направленности, уменьшением уровня боковых и задних лепестков и использованием радиопоглощающих элементов и металлических экранов.

Моделирование антенны ФАР начали с выбора вида одиночных принимающих (излучающих) элементов. Анализ характеристик одиночных антенных элементов (коэффициента усиления, формы диаграммы направленности, уровня боковых лепестков и др.) проводился путём моделирования в режиме излучения с помощью программы CST Studio Suite 2021. Из знакомства с работами, посвящёнными одиночным антеннам [7, 8, 10, 19], наибольший интерес вызвала работа [20], посвящённая исследованию характеристик одиночных излучателей малоэлементных ФАР (от 2 до 8 элементов).

В прототипе-источнике все изучаемые антенны (различные патч и щели) работали на открытое пространство; используемые подложки имели малые значения диэлектрических постоянных (от 2,2 до 6,15); с учётом открытости конструкций и работы их на воздух эффективное значение диэлектрических постоянных снижалось от 2,2 и 6,15 до 1,58 и 4,62.

В разрабатываемой антенне все излучающие элементы работают в среде с $\epsilon = 50$; ФАР выполнена на диэлектрической подложке с $\epsilon = 50$. В рассматриваемой работе [20] детально проанализированы характеристики четырёх видов щелей (рис.1) и показано, что наибольшей широкополосностью обладают гантелеобразные щели с круговыми элементами на концах. Именно такой (см. рис. 1, б) вид щели был выбран нами для дальнейшей разработки.

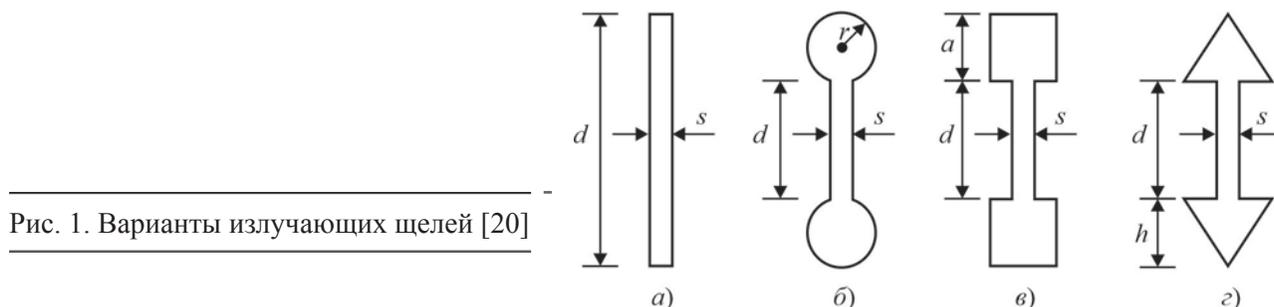


Рис. 1. Варианты излучающих щелей [20]

Исходная модель одиночной антенны приведена на рис. 2. Подложка имеет вид квадратной керамической пластины, на верхней поверхности которой размещается слой металлизации с вытравленной гантелеобразной щелью.

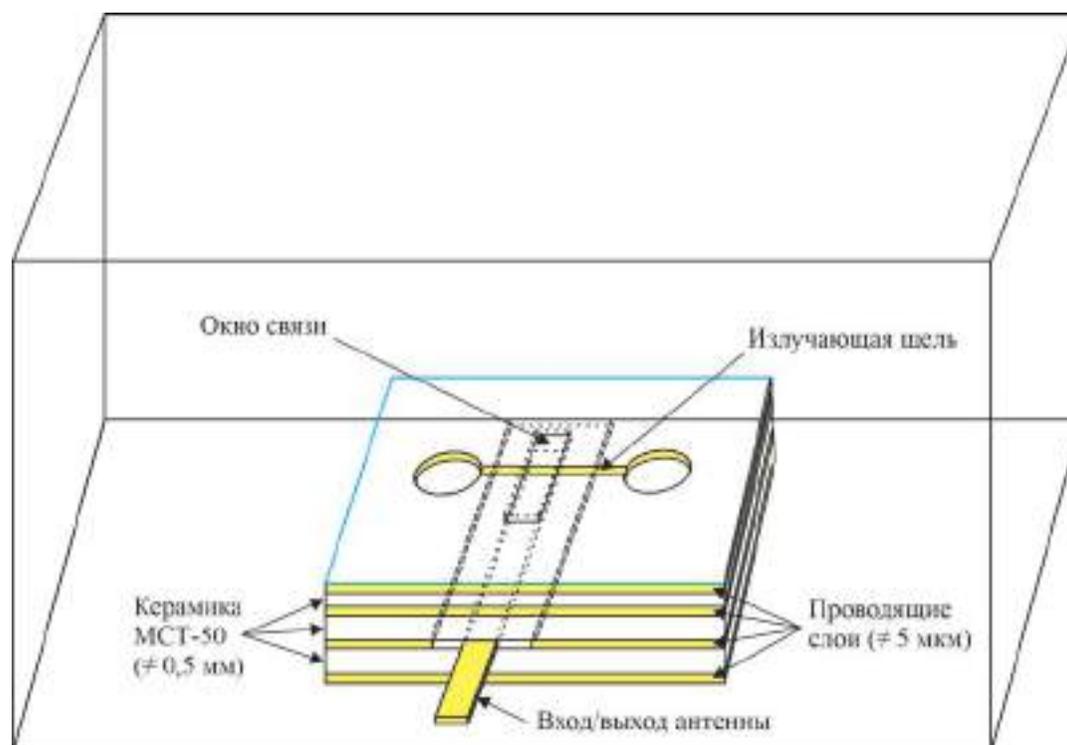


Рис. 2. Структура одиночной антенны на керамике МСТ-50 с $\epsilon = 50$

Полосковые щелевые излучатели по принципу технологической реализации схожи с волноводно-щелевыми антеннами. Их основу составляет симметричная полосковая линия передачи, в верхнем экране которой прорезана поперечная щель. Длина волны в диэлектрике с $\epsilon = 50$ на частоте 3,6 ГГц равна 11,777 мм. Длина смоделированной гантелеобразной антенны на частоту 3,6 ГГц оказалась равной 8 мм, что составляет 0,68 длины волны. Ширина щели составила 0,16 мм.

Первоначально при моделировании вся конструкция помещалась в среду с $\epsilon = 50$ и величиной потерь, аналогичной потерям в керамических платах. Размеры зоны среды – 50×50×70 мм.

Как видно из рис. 3, а, форма диаграммы направленности данной конструкции крайне неудовлетворительная. Это связано с сильной перекачкой энергии поля в диэлектрик и возникновением поперечных волн, излучаемых краями подложки, при одновременном уменьшении мощности, излучаемой щелью. Коэффициент усиления равен 2,39 дБ. Многолепестковая форма диаграммы направленности формируется из взаимодействия полей щели и краевых полей подложки. Замыкание конца полоска на край щели увеличило долю мощности, излучаемой щелью, что привело к увеличению коэффициента усиления до 6,31 дБ, но не изменило характер диаграмм направленности и направление лучей с максимальным усилением (рис. 3, б) и не сформировало луч, перпендикулярный к плоскости антенны. Методы борьбы с поперечными волнами в симметричных полосковых системах хорошо известны: шунтирование внешних проводящих слоёв полосковой линии короткозамыкателями в виде металлизированных отверстий.

Шунтирующий контур должен окружать излучающую щель. Были проверены прямоугольные, квадратные, круглые и эллиптические формы размещения шунтирующих перемычек. Приемлемые результаты по качеству согласования были получены для эллиптической формы, обеспечившей в диапазоне частот 3,0...4,0 ГГц полосу частот около 400 МГц по уровню минус 10 дБ (рис. 3, в). После введения шунтирующего контура диаграмма антенны приобрела нужную форму: явно выраженный луч, перпендикулярный к плоскости антенны, и задний лепесток, величина которого довольно велика из-за малой площади керамической платы. Величина усиления 4,82 дБ является приемлемой.

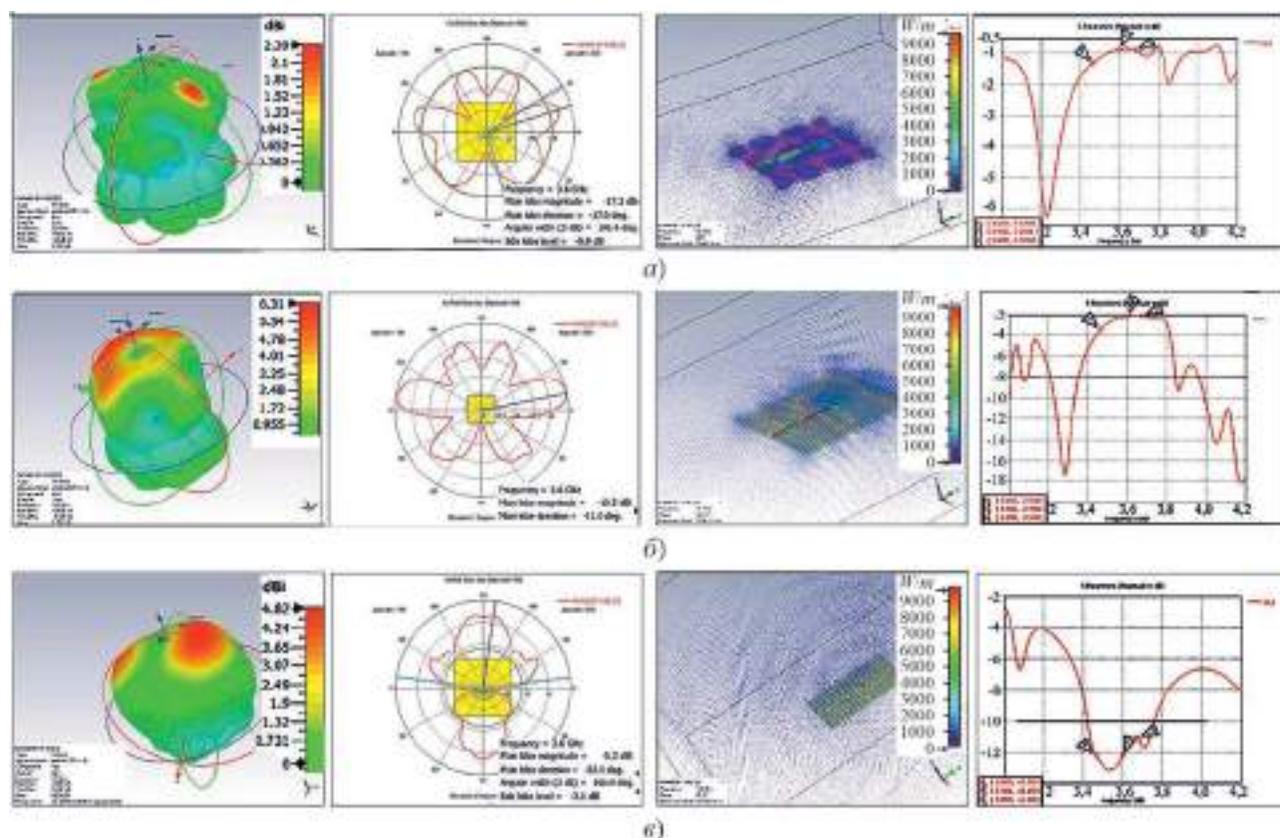


Рис. 3. Диаграммы направленности одиночной щелевой антенны на керамике МСТ-50 с $\epsilon = 50$:

a – щель антенны возбуждается полем полосковой линии; *b* – щель антенны возбуждается полосковой линией, замкнутой на край щели; *в* – щель антенны возбуждается полосковой линией, замкнутой на край щели, при наличии шунтов

Структурная схема щелевой антенны с эллиптическим шунтирующим контуром приведена на рис. 4. Конструктивное исполнение антенны представлено на рис. 5.

Существенные усилия потребовались для отработки согласования питающего микрополоска с сопротивлением 50 Ом. В большинстве описанных случаев принимающие/излучающие щели с полосковой линией связываются через свои электромагнитные поля. При этом полосок для лучшей связи смещается от середины щели, где её сопротивление составляет сотни ом, к краю щели, где сопротивление понижается до нужного уровня.

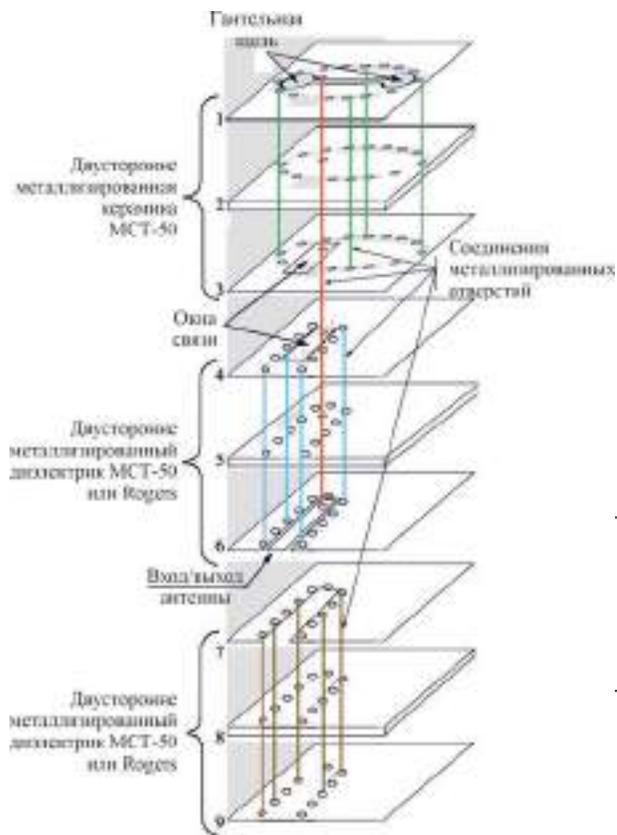


Рис. 4. Структурная схема одиночной щелевой антенны на керамике МСТ-50 с $\epsilon = 50$

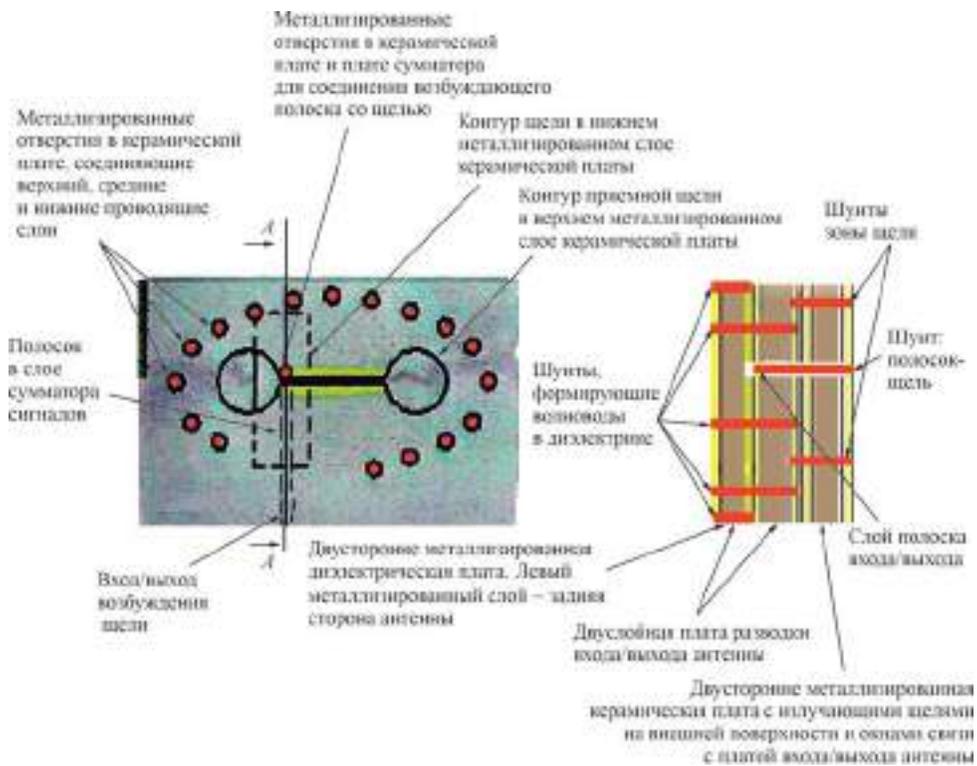


Рис. 5. Конструктивная структура одиночной щели с шунтирующим контуром эллиптической формы

В нашем случае необходимое согласование обеспечивалось, когда конец полоска соединялся с краем щели в точке перехода щели в окружность гантели. Соединение обеспечивалось металлизированным отверстием, связывающим верхний слой керамической платы, на котором сформирована щель, с полоском. Моделирование параметров одиночной антенны с шунтирующим контуром показало хорошие результаты. На рис. 6. показаны результаты расчёта одиночной щели. Коэффициент усиления составил 4,18 дБ, что соответствует ожидаемым значениям. Уровень первых боковых лепестков равен -3,46 дБ при ширине диаграммы 80 град по уровню 0,7, что также соответствует значениям для одиночного излучателя.

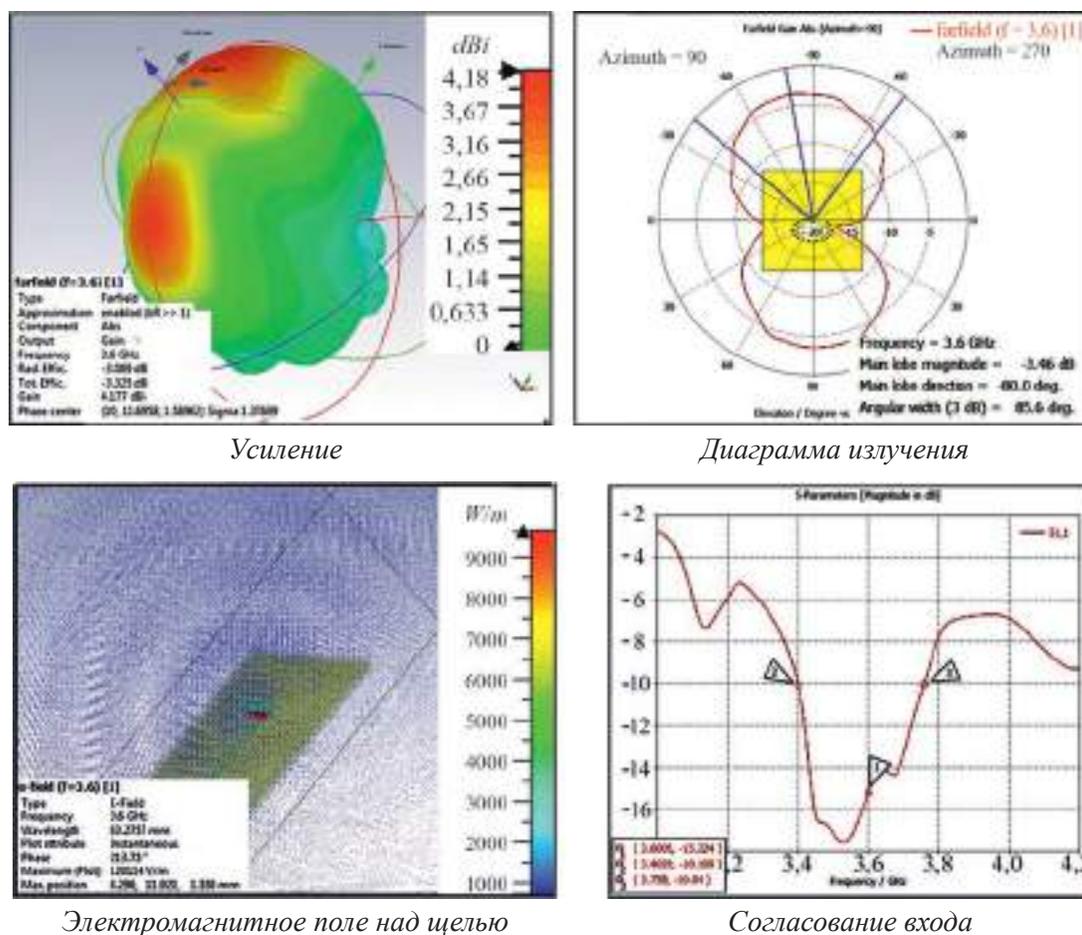


Рис. 6. Смоделированная диаграмма направленности согласованной щели (длина щели – 2,71 мм; ширина щели – 0,16 мм; радиус окружности – 0,8 мм; параметры эллипса: большая ось – 8 мм, малая ось – 4,34 мм; диаметр отверстий – 0,4 мм; число отверстий – 17 шт.)

Разработка конструкции одиночного антенного элемента позволила перейти к этапу разработки ФАР. Известно, что регулярное размещение антенн в двумерных ФАР рекомендуется с шагом 0,5...0,7 длины волны, что обеспечивает максимальное усиление при приемлемом уровне боковых лепестков. В нашем случае при длине большой оси эллипса 8 мм размещение антенн по обеим координатам антенны с шагом 8 мм удовлетворяет рекомендациям со значением 0,679 (рис. 7).

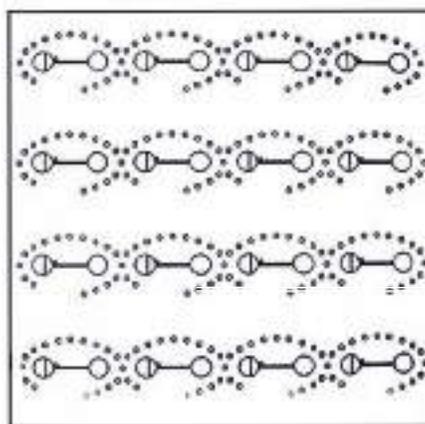


Рис. 7. Размещение щелей на керамической плате антенны

Конструкция щелей на плате ФАР, число слоёв и их назначение аналогично тому, что было и для одиночной щели. Отличие заключается лишь в том, что вместо одиночного полоска используется разветвлённая полосковая система, обеспечивающая суммирование сигналов от всех щелей (антенн) на входе (выходе) антенны (рис. 8).

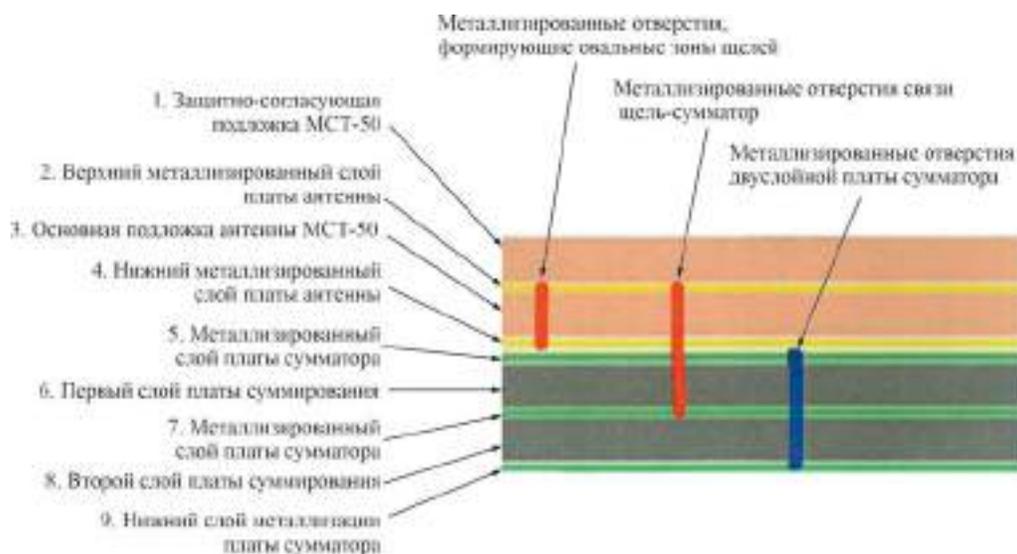


Рис. 8. Структура слоёв антенной решётки для антенны-аппликатора

Для уменьшения боковых лепестков и повышения помехоустойчивости прямоугольная керамическая плата ФАР с платой сумматора помещена в металлическое кольцо с диаметром, равным диагонали платы. Образовавшиеся четыре серповидные полости заполнены ферроэпоксидной поглощающей массой. Первоначально в качестве диэлектриков во всех слоях (1, 3, 6 и 8) использовалась керамика с $\epsilon = 50$. Результаты моделирования такой антенны приведены на рис. 9.

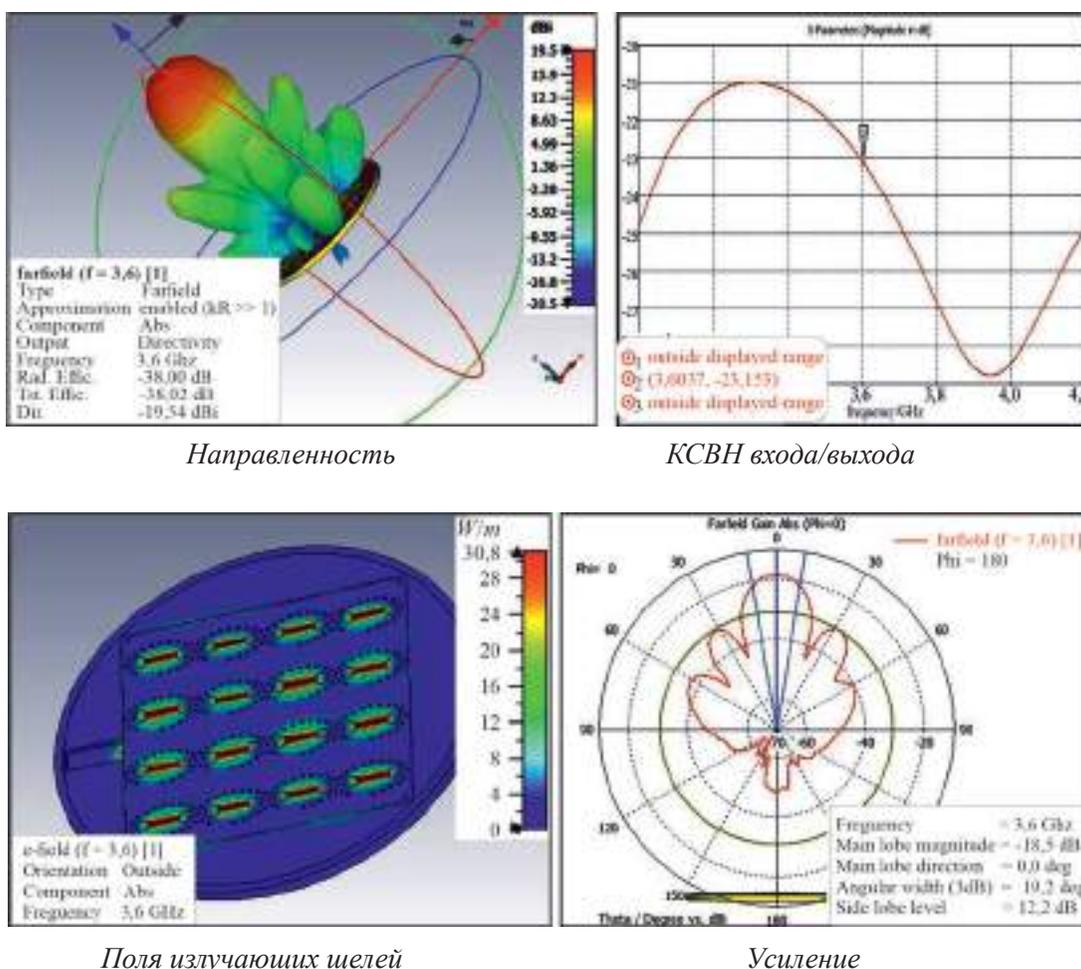


Рис. 9. Диаграммы ФАР в аксонометрической и параметрической форме

Как следует из рис. 9, форма диаграммы направленности соответствует ожиданиям, а вот значение коэффициента усиления 16-элементной ФАР антенны минус 18,5 дБ по сравнению с одиночной антенной было полной неожиданностью. Анализ причин этого явления объясняется просто. Это связано с сильной перекачкой энергии поля сумматора в диэлектрик с большим ϵ (50) и возникновением поперечных волн, излучаемых краями подложки, при одновременном уменьшении мощности, излучаемой щелями.

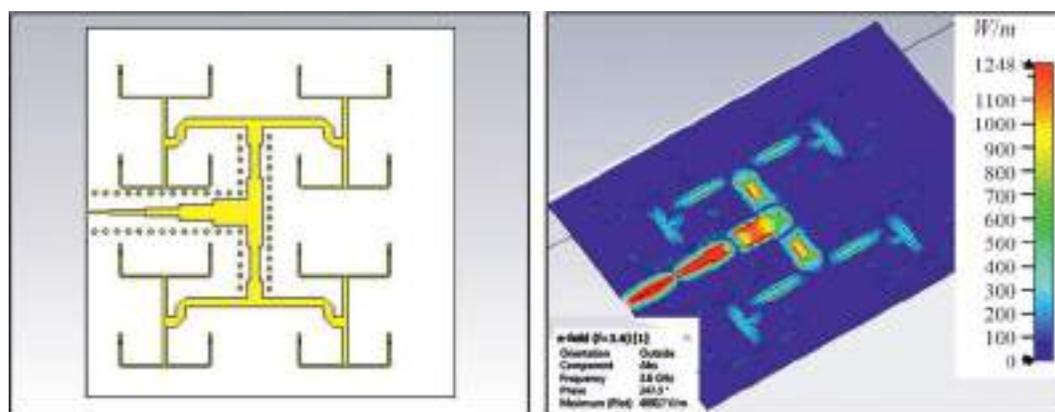
Топология схемы сумматора приведена на рис. 10, а с частичным шунтированием области вокруг полосков сумматора.

Для предотвращения возникновения поперечных волн полосковые линии экранируются с помощью короткозамыкателей внешних металлизированных («земляных») слоёв платы сумматора. Анализ диаграмм направленности с потерями и без даёт основание полагать, что общие потери в антенне на керамической подложке равны 38 дБ (18,4 дБ + 19,6 дБ) (рис. 10, б).

Попытка полной экранировки линий сумматора (см. рис. 10, б) снизила потери усиления с минус 25 до минус 18,4 дБ, подтвердив общий вывод о том, что создать ФАР, выполненную полностью на керамике с высоким ϵ , невозможно. Необходим переход на подложку сумматора с низ-

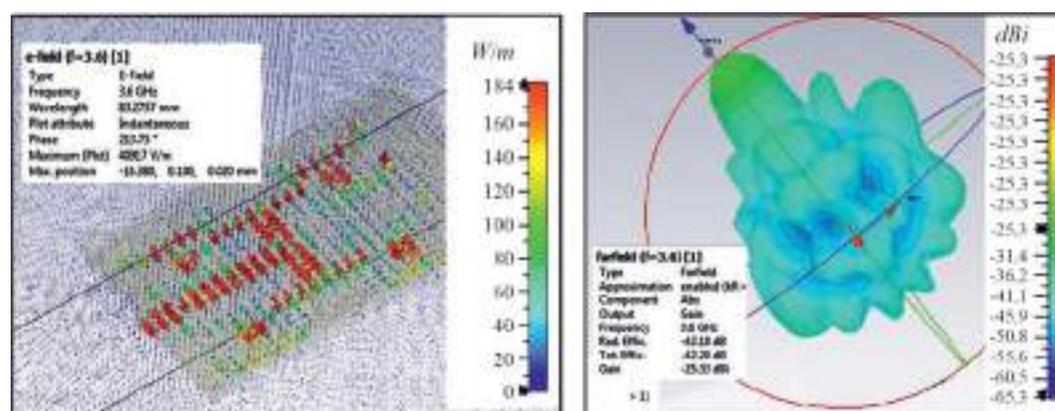
ким значением ϵ , который ограничивается тем обстоятельством, что в Т-образных делителях/сумматорах необходимо использовать четвертьволновые полосковые трансформаторы. Из-за ограниченных размеров подложки разместить полоски сумматора оказалось возможным только при $\epsilon = 10,7$ материала RO6010. Разработанная топология сумматора приведена на рис. 11.

Характеристики ФАР для случая применения материалов с различными ϵ плат подложек со щелями и сумматора приведены на рис. 12.



Топология сумматора на керамике

Поля сигналов сумматора и щелей

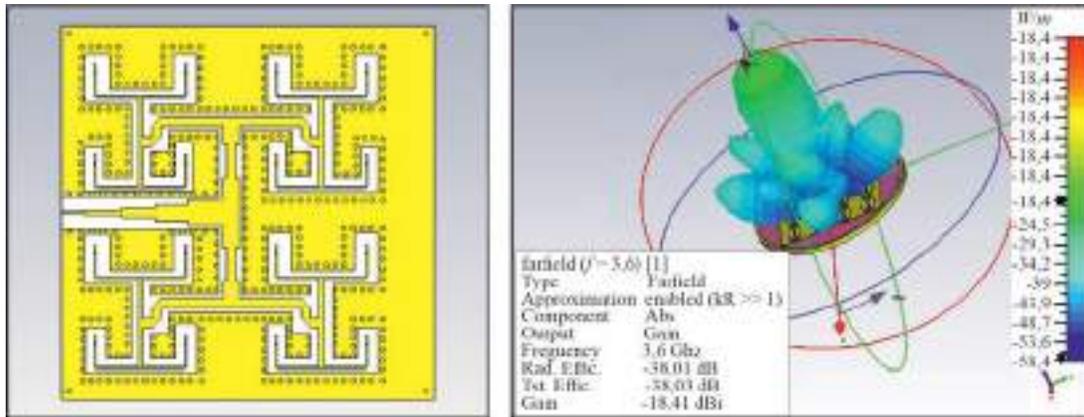


Поля ЭМИ сумматора

Усиление ФАР

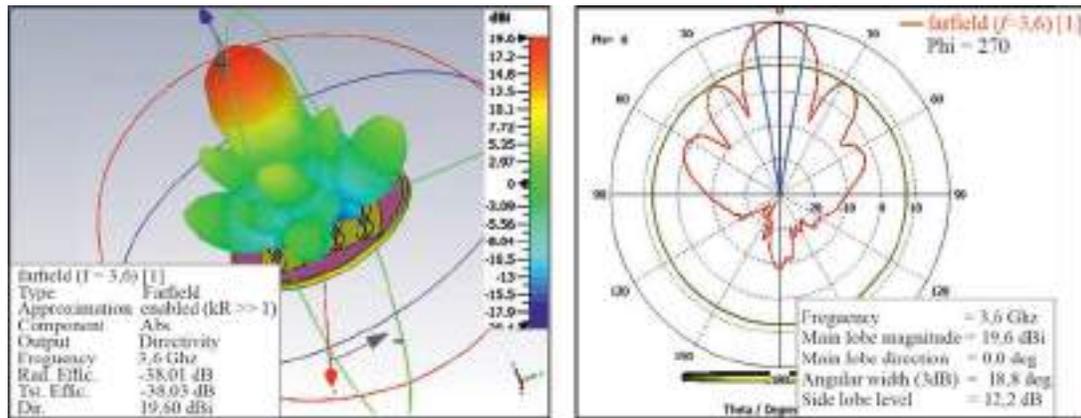
а)

Рис. 10. Топология полоскового сумматора на керамике МСТ-50 (а), а также топология сумматора с полным шунтированием и параметры ФАР на керамике МСТ-50 (б) (см. также с. 17)



Топология сумматора с полным шунтированием микрополосков

Усиление полностью керамической ФАР (минус 18,4 дБ)



Направленность ФАР (19,6 дБ)

б)

Рис. 10. Топология полоскового сумматора на керамике МСТ-50 (а), а также топология сумматора с полным шунтированием и параметры ФАР на керамике МСТ-50 (б)

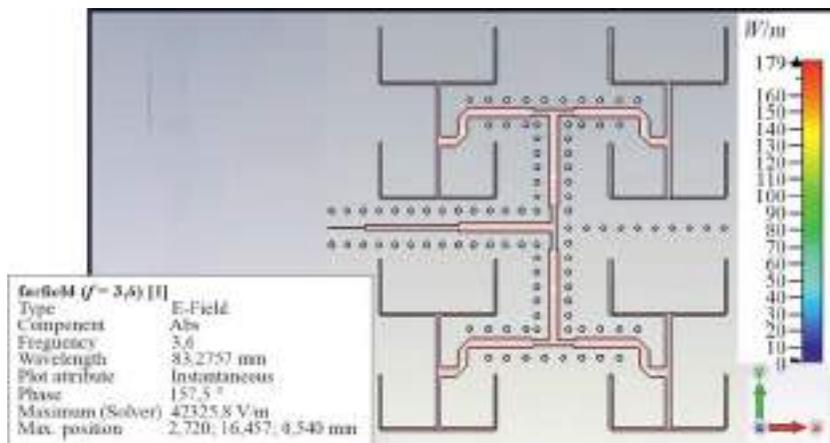


Рис.11. Топология сумматора на диэлектрике RO6010

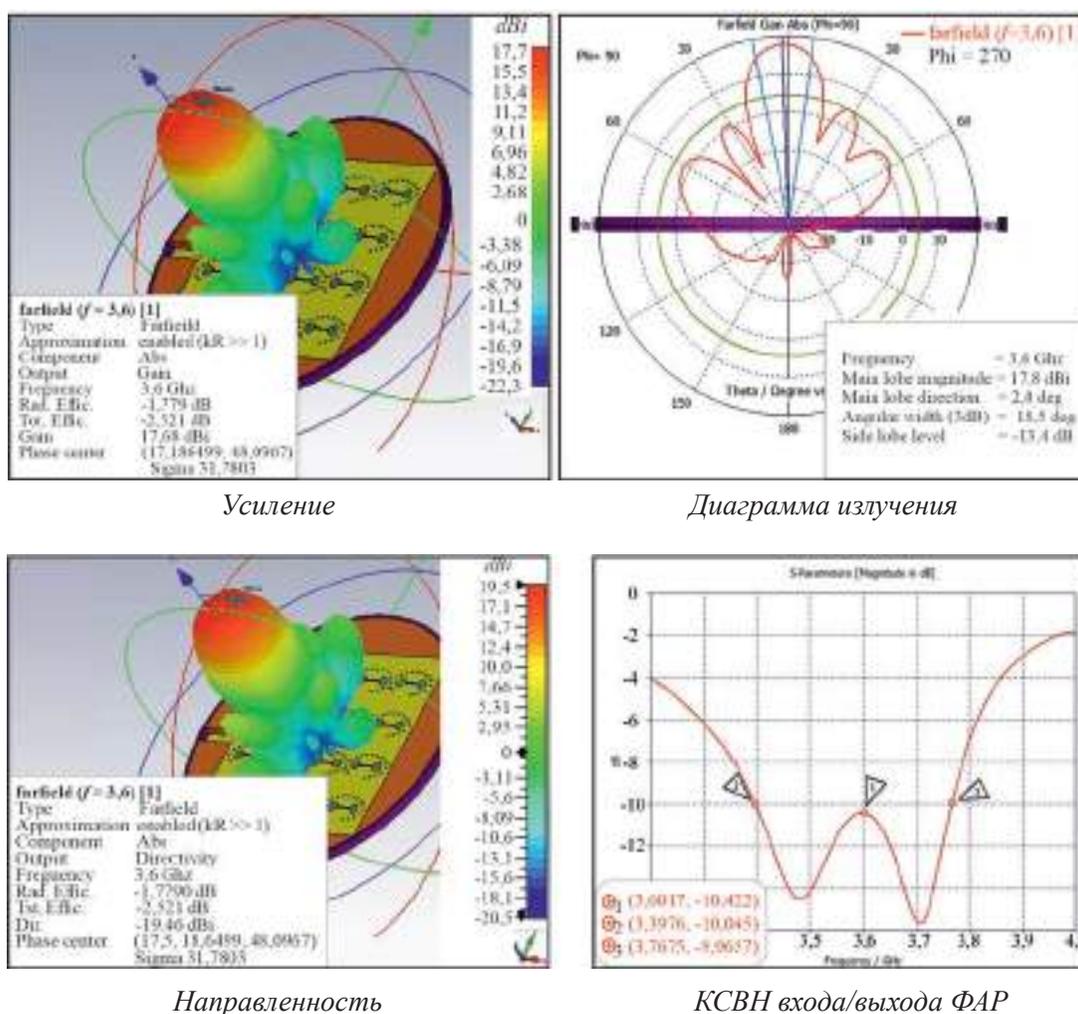


Рис.12. Характеристики ФАР с комбинацией ϵ подложек 50 и 10,7 единиц

Моделирование ФАР этого варианта показало, что коэффициент усиления ФАР равен 17,7 дБ, ширина луча по уровню минус 3 дБ равна 18,5 град при уровне первых боковых -13,4 дБ, что выглядит близким по параметрам к требуемым значениям. Возможным способом улучшения параметров ФАР является фокусировка её луча в ближней зоне за счёт введения дополнительных фазовых сдвигов в полоски, питающие щели. Топология сумматора для этого случая приведена на рис. 13.

Впрочем, ожидать заметного улучшения параметров в нашем случае не приходилось, так как для хорошей фокусировки апертура антенны должна достигать десятков длин волн, а в нашем случае это лишь три длины [28].

Фактически введение фазосдвигающих элементов улучшило направленность и усиление на 1,0...1,1 дБ и снизило уровень боковых лепестков на 1,1 дБ, что несколько повышает помехоустойчивости ФАР (рис.14).

Окончательный результат расчёта параметров ФАР при работе на среду с $\epsilon = 50$ и $\text{tg}\delta = 0,32$ тела человека приведён на рис. 15.

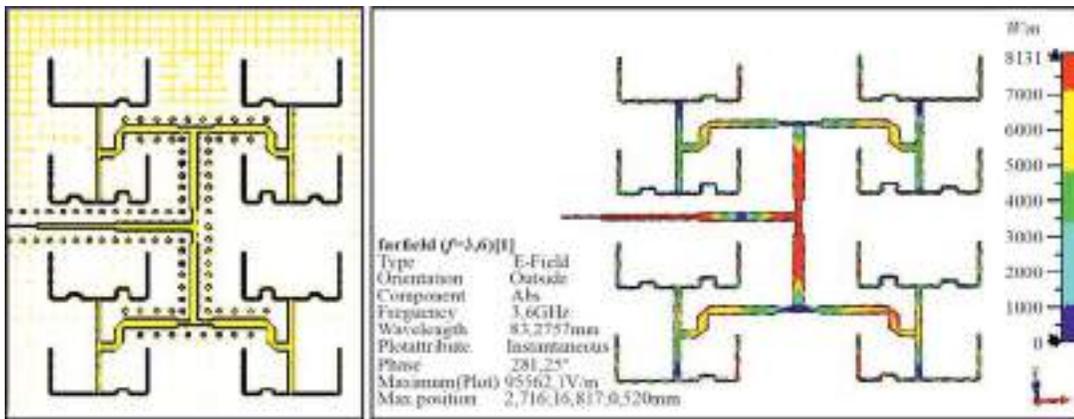
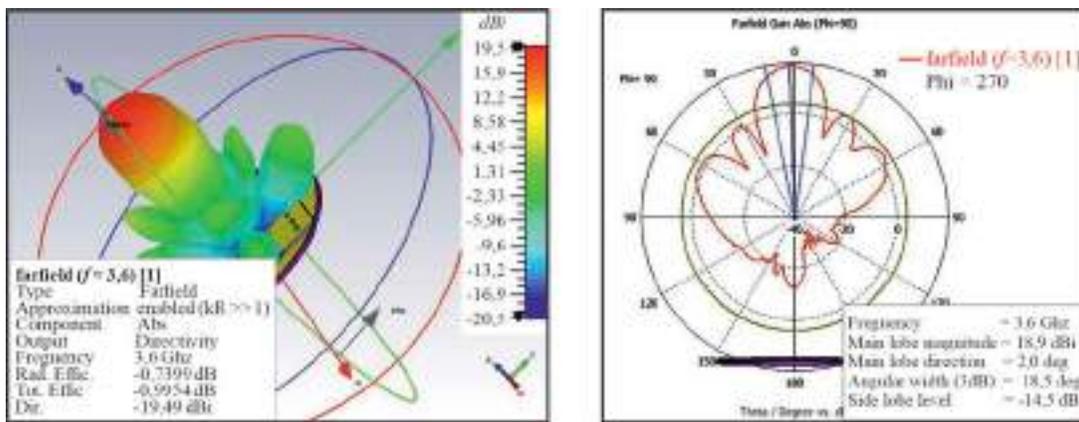
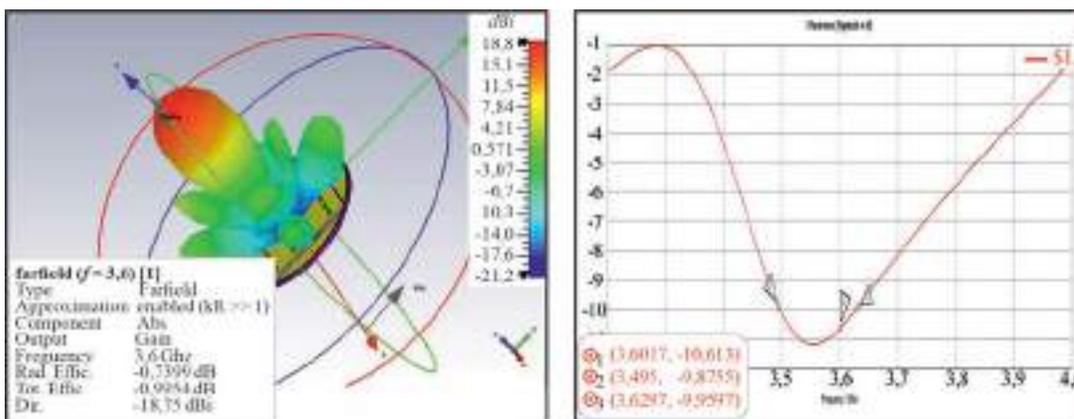


Рис. 13. Топология сумматора с элементами для фокусировки в ближней зоне



Направленность

Диаграмма излучения



Усиление

Согласованность

Рис. 14. Параметры ФАР с фокусировкой в ближней зоне

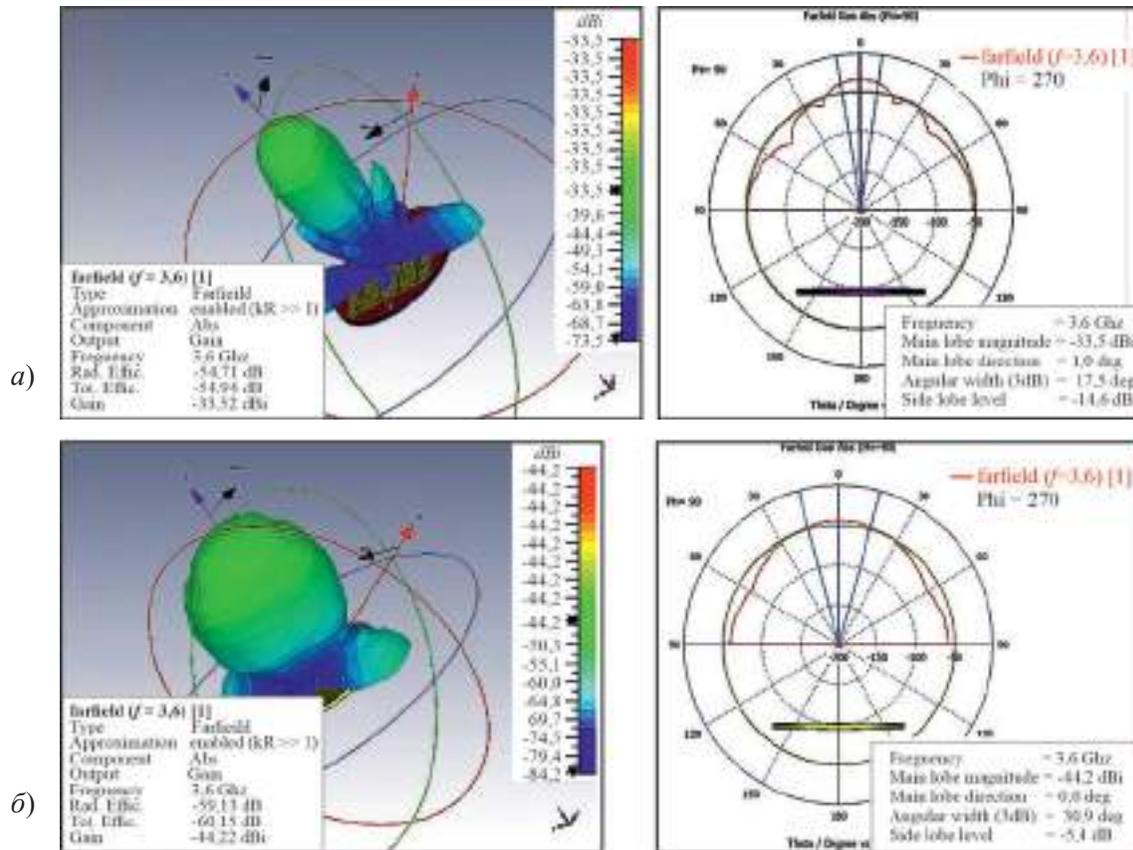


Рис. 15. Диаграммы усиления ФАР (а) и одиночной щели (б) в логарифмическом масштабе при работе на среду с потерями $\text{tg}\delta = 0,32$

Общепринятое изображение диаграмм направленности антенн в логарифмическом масштабе из-за большого динамического диапазона отображаемых характеристик по оси Z искажает реальную форму диаграммы, формируемой в реальном пространстве, скрадывая реальное соотношение сравниваемых величин. Для наглядности на рис. 16 приводятся в линейном масштабе диаграммы ФАР и одиночной щели.

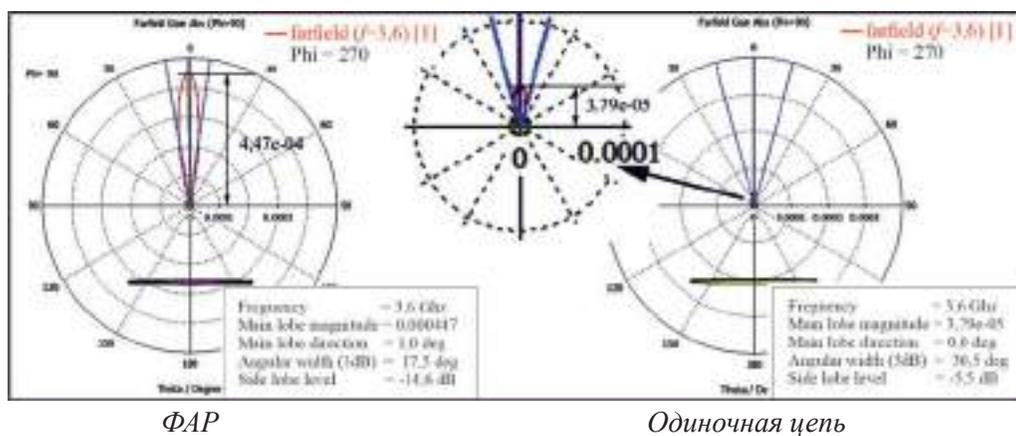


Рис. 16. Диаграммы направленности антенн в линейном масштабе при работе на среду с потерями $\text{tg}\delta = 0,32$

На рис. 16 видно, насколько глубже можно проникнуть в исследуемую среду (на порядок) при реализации ФАР 4×4 элемента по сравнению с одиночной антенной.

3. ВЫВОДЫ

1. Использование в качестве подложки антенны материала с большим значением относительной диэлектрической проницаемости (50), согласованным с относительной диэлектрической проницаемостью исследуемых органов, позволяет создать ФАР формата 4×4 элемента с приемлемыми габаритами.

2. Шестнадцатиеlementная ФАР повышает коэффициент усиления на 10,7 дБ, что позволяет увеличить глубину обнаружения аномалии в разы.

3. Элементы фазовой фокусировки луча ФАР в ближней зоне увеличивают усиление на 1...1,1 дБ и уменьшают уровень боковых и задних лепестков тоже на 1...1,1 дБ, что ограничивается малой апертурой [28].

4. Металлическое кольцо и секторные поглотители способствуют повышению помехозащищённости.

5. Экспериментальные попытки изготовления керамических плат выявили необходимость доработки режимов сборки и лазерной резки, прошивки отверстий и металлизации керамики МСТ-50.

Авторы выражают благодарность И. А. Балыко и О. А. Морозову за инициативу постановки и финансовую поддержку проведения настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Barrett, A. H.** Subcutaneous temperature: a method of noninvasive sensing / A. H. Barrett, Ph. C. Myers // Science. – 1975. – Vol. 190. – P. 669 – 671.

2. **Патент № 2407429 РФ.** Антенна-аппликатор и устройство для определения температурных изменений внутренних тканей биологического объекта и способы определения температурных изменений и выявления риска рака: заявл. 26.12.2008; опублик. 10.07.2010 / Веснин С. Г.

3. **Веснин, С. Г.** Современная микроволновая радиотермометрия молочных желез / С. Г. Веснин, М. А. Каплан, Р. С. Авакян // Опухоли женской репродуктивной системы. – 2008. – № 3. – С. 28 – 33.

4. **Венноев, Р. С.** Радиотермометрия в диагностике заболеваний щитовидной железы / Р. С. Венноев, А. В. Золкин // Хирургия. – 2006. – № 6. – С. 54 – 58.

5. Использование глубинной интегральной радиотермометрии для оценки изменения микроциркуляции при КВЧ-терапии у больных с деформирующим артрозом тазобедренного сустава и болезнью Пертеса / Н. Б. Капустина, А. В. Корнаухова, А. Г. Полякова [и др.]. – Н. Новгород: Изд-во ИНГУ, 2001. – С. 46 – 52.

6. **Кубланов, В. С.** Многоканальная СВЧ-радиотермография в задаче исследования функционального состояния головного мозга / В. С. Кубланов // 10 Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь». – Воронеж, 2004. – С. 721 – 734.

7. **Leroy, Y.** Non-invasive microwave radiometry / Y. Leroy, B. Vocquet, A. Mammouni // Physiol. Means. – 1998. – Vol. 19, No 2. – P. 127 – 148.

8. **Седельников, Ю. Е.** Сфокусированные антенны-аппликаторы в задачах диагностической радиотермометрии / Ю. Е. Седельников, В. С. Кубланов, О. В. Потапова // Журнал Радиоэлектроники. – 2018. – № 7. – С. 1684 – 1719. – DOI: 10.308898/1684-1719. 2018.7.4.

9. **Потапова, О. В.** Оценка параметров сфокусированного электромагнитного поля при использовании линейных апертур в радиотермометрии / О. В. Потапова, К. Н. Халикова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 31 – 36.

10. **Патент № 2723394 РФ.** Способ инициации гибели опухолевых клеток гидроксидом алюминия трисульфофталоцианина и ВЧ- и СВЧ-энергией волнового излучения: заявл. 10.07.2018; опубл. 13.01.2020 / Цугленок Н. В.
11. Диэлектрическая проницаемость 8-и некоторых тканей человека при температуре 37 °С и различной частоте // Справочник химика 21. Химия и химическая технология. – С. 35. – URL: <http://www.chem21.info/tabs/256433>.
12. Глубина проникновения поля частотой 2450 МГц в различные продукты при температуре // Студопедия. – № 75. – С. 18 – 25. – URL: <https://studopedia.org/13128716.html>.
13. **Рагимов, Э. А.** Воздействие микроволнового излучения на многослойные биологические ткани: Выпускная квалификационная работа студента группы № ЭП-91 / Э. А. Рагимов. – М.: Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Факультет электроники и телекоммуникаций, 2013. – С.11 – 12. – URL: <https://www.hse.ru/edu/vkr/85730325>.
14. **Енохович, А. С.** Справочник по физике и технике: учебное пособие для учащихся / А. С. Енохович. – М.: Просвещение, 1983. – 255 с.
15. **Веснин, С. Г.** Миниатюрные антенны-аппликаторы для микроволновых радиотермометров медицинского назначения / С. Г. Веснин, М. К. Седанкин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2011. – № 10. – С. 51 – 54.
16. **Jacobsen, S.** Characteristics of microstrip muscle-loaded singlearm archimedean spiral antenna as investigated by FDTD numerical computations / S. Jacobsen, P. R. Stauffer and H. O. Rolfnes // IEEE Transaction on Biomedical Engineering. – 2005. – Vol. 52, No 2. – P. 321 – 330.
17. Miniature sensor for measurement and control of temperatures by microwave radiometry in medical applications / L. Vanoverschelde, V. Dubois, J. P. Thorni [et al.] // Microwave Simposium Digest. IEEE MTT-S International. – 2001. – No 2. – P. 155 – 158.
18. Confocal microwave imaging for breast cancer detection: Localization of tumors in dimensions / L. Fear, X. Li, S. C. Hagness and M. Stuchly // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2002. – Vol. 49, No 8. – P. 812 – 822.
19. **Седанкин, М. К.** Антенны-аппликаторы для радиометрического исследования тепловых полей внутренних тканей биологического объекта: диссертация на соискание учёной степени к.т.н. / М. К. Седанкин. – М.: МГТУ им. Э. Баумана, 2013.
20. **MSc. Adel Bedair Abdel-Mooty Abdel-Rahman.** Dissertation design and development of high gain wideband microstrip antenna and DGS filters using numerical experimentation approach. – Fakultat Elektrotechnik Informationstechnikder Otto-von Guericke-Universidad Mag-deburg, 05. 08. 1968.
21. **Халикова, К. Н.** Антенны, сфокусированные в области ближнего излучённого поля, для задач микроволновых измерений: диссертация на соискание учёной степени к.т.н. / К. Н. Халикова. – Казань: Казанский Университет им. А.Н. Туполева. КАИ, 2017.
22. **Сельский, А. Г.** Радиометр с фокусированной антенной для неинвазивного измерения температуры внутренних органов человека: диссертация на соискание учёной степени к.т.н. / А. Г. Сельский. – М.: ИРЭ АН СССР, 1989.
23. **Филатов А. В.** Модель входного устройства радиометрического приёмника для измерения профиля измерения глубинных температур биологических сред методом неинвазивной радиометрии // Электроника. Измерительная техника. Радиотехника и связь: доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 21, № 4.
24. **Payam Nayri.** Broadband focusing using aperture-coupled microstrip patch antenna arrays / Payam Nayri, Atef Z. // 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 13-17 April 2015, Lisbon, Portugal.
25. Phased array antenna limitations for ultra-wideband focusing / Payam Nauri, Atef Z., Elshrbtini and Randi Haupt // 2014 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), 16-19 Nov. 2014, Antibes Juan-les-Pins, France.
26. A near field focused microstrip array for a radiometric temperature sensor / K. D. Stefan, J. B. Miad, D. M. Pozar [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – April 2007. – Vol. 55, No 4. – P. 1199 – 1203.
27. Сфокусированные антенны в задачах контактной радиотермометрии / Ю. Е. Седельников, О. В. Потапова, А. Р. Садыков, В. А. Скачков // Журнал Радиоэлектроники. – 2021. – № 3. – С. 1684 – 1719.
28. **Смирнов, В. Ю.** Линейные фазированные антенные решётки, сфокусированные в ближней зоне / В. Ю. Смирнов, О. Р. Никитин // Вестник РГРТУ. – 2008. – № 4 (вып. 26).

Статья поступила 17 февраля 2023 г.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВОГО КВАЗИФРАКТАЛЬНОГО КЛИСТРОННОГО РЕЗОНАТОРА

А. Ю. Мирошниченко, М. А. Чернышев, Н. А. Акафьева

*Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.*

Исследован многочастотный четырехлучевой резонатор для приборов клистронного типа. Приведены результаты электродинамического моделирования. Найден и исследован ряд резонансных частот с синфазным и противофазным распределением высокочастотного электрического поля. Изучены многочастотный режим резонатора и режим работы на кратных резонансных частотах, а также произведен расчет электронных параметров резонатора. Резонатор может быть использован при создании малогабаритных и простых по конструкции СВЧ-генераторов и усилителей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, работающих в одно- и многочастотном режимах.

КС: многочастотный клистрон, двухзоровый квазифрактальный резонатор, H-фрактал, многочастотный режим

INVESTIGATION OF A MULTI-FREQUENCY FOUR-BEAM QUASI-FRACTAL KLYSTRON RESONATOR

A. Yu. Miroshnichenko, M. A. Chernyshev, N. A. Akafyeva

State Technical University named after Yu. A. Gagarin, Saratov

A multifrequency four-beam resonator for klystron-type devices has been studied. The results of electrodynamic simulation are presented. A number of resonant frequencies with in-phase and anti-phase distributions of the high-frequency electric field have been found and studied. The multifrequency mode of the resonator and the mode of operation at multiple resonant frequencies were studied, and the electronic parameters of the resonator were calculated. The resonator can be used to create small-sized and simple microwave generators and amplifiers in the centimeter and millimeter wavelength ranges operating in single- and multi-frequency modes.

Keywords: multiple-beam klystron, two-gap quasi-fractal resonator, H-fractal, multifrequency mode

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных электроракуумных микроволновых приборов в последние десятилетия происходит достаточно высокими темпами, что приводит к непрерывному возрастанию их выходной мощности, повышению КПД, расширению частотных диапазонов [1]. Среди множества типов электроракуумных микроволновых приборов достаточно широко распространены пролетные клистроны, в силу своих технических параметров и преимуществ. Несмотря на то, что клистроны впервые сконструированы много лет назад, они продолжают совершенствоваться-

ся, улучшаются их выходные параметры и характеристики. Основное предназначение клистронов – это усилители и генераторы в радиолокации, системах связи, телекоммуникации, ускорители заряженных частиц, а также умножители частоты [2–6].

В различных отраслях науки и техники также находят применение многолучевые клистроны (МЛК), которые имеют меньшее ускоряющее напряжение и улучшенные массогабаритные характеристики по сравнению с их однолучевыми аналогами [7].

Одним из важных элементов клистрона является его резонансная система, от параметров которой зависят выходные характеристики прибора в целом. При этом при использовании в МЛК однозачорного резонатора, например призматического, работающего на низшем виде колебаний (H_{101}), поле в пролетных каналах имеет сильную неравномерность, что препятствует получению высокого электронного КПД прибора [8]. Для уменьшения этой неравномерности возможно использование в пролетных клистромах двухзачорных квазифрактальных резонаторов (ДКФР). Такие резонаторы могут быть эффективны при разработке многолучевых двухчастотных или многочастотных электронных приборов клистронного типа, работающих в качестве мощных усилителей, генераторов или умножителей частоты [9, 10].

Среди достоинств ДКФР – более высокое характеристическое сопротивление, которое получается за счет формы индуктивных элементов и удлинения пути высокочастотных токов в резонансных проводниках на противофазном (π) виде колебаний, а также уменьшенные габариты и масса резонаторов. Но при этом ДКФР – это сложные многочастотные системы. Свойства ДКФР при работе их в многомодовом режиме взаимодействия в настоящее время детально не исследованы, поскольку такие системы характеризуются сложной геометрией, неоднородным трехмерным распределением ВЧ электрического поля в пространстве взаимодействия и широким спектром видов колебаний.

Целью работы является определение с помощью численного 3D-моделирования основных электродинамических параметров ДКФР, изучение процесса многомодового взаимодействия ДКФР с многолучевым электронным потоком, изучение возможности настройки резонатора на кратные резонансные частоты.

2. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

В работе исследован четырехлучевой ДКФР. В качестве основы квазифрактальной структуры выбран Н-фрактал, в котором начальный элемент напоминает заглавную букву Н (рис. 1, а).

Н-фрактал, или Н-дерево, – это самоподобный фрактал со всё меньшими линейными сегментами, в котором отрезок линии разбивается на более мелкие линии в конце. Принцип Н-фрактала имеет практическое применение в электронике, например, при создании микроволновых фильтров и антенн [11] и может быть сформирован из трехмерных Н-фрактальных конфигураций (рис. 1, б).

Конструкция исследуемого четырехлучевого ДКФР с обозначением основных характерных размеров показана на рис. 2.

В отличие от классического однозачорного призматического резонатора, который возбуждается на низшем виде колебаний H_{101} , разработанная нами конструкция резонатора состоит из прямоугольного объемного резонатора 1, внутри которого располагается опорный стержень 2, закрепленный на боковой стенке объемного резонатора. С помощью вспомогательной соединительной перемычки опорный стержень соединен с двумя «ветвями» 3, на которых закреплены центральные пролетные втулки 4, имеющие отверстия 5 для пролета электронного потока. Боковые втулки 6, расположенные соосно с центральными втулками, также имеют отверстия

для пролета электронного потока. Между центральными и боковыми втулками образованы восемь высокочастотных зазоров взаимодействия. Опорный стержень совместно с двумя «ветвями» образуют четвертьволновую линию, которая нагружена на емкость высокочастотных зазоров. Многолучевой электронный поток, попадая в резонатор через пролетные отверстия в боковых втулках, будет взаимодействовать с полями высокочастотных зазоров.

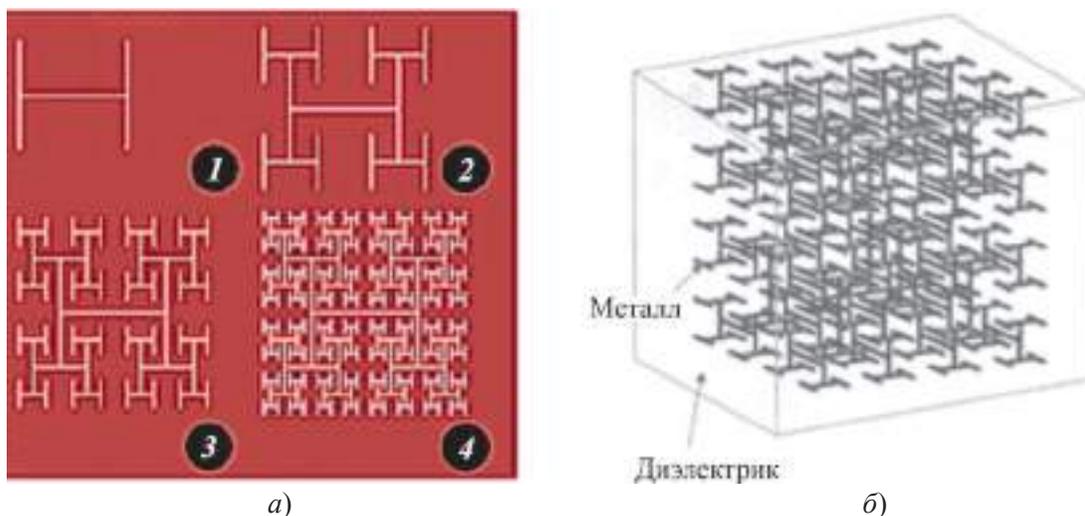


Рис. 1. Итерации создания H-фрактала 1...4 (а) и трехмерная фрактальная структура с H в качестве исходного элемента [11] (б)

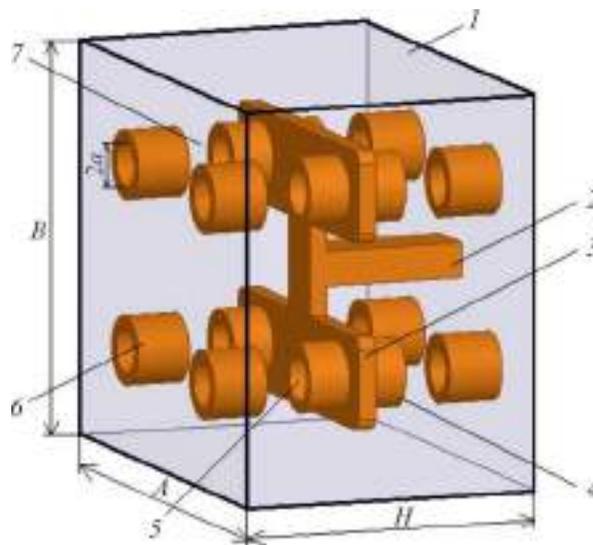


Рис. 2. Конструкция четырехлучевого ДКФР

В ходе исследования были созданы два конструктивных варианта резонатора: с четвертьволновым опорным стержнем (рис. 3, а) и с четвертьволновым опорным стержнем конической формы (рис. 3, б).

ДКФР является сложной многочастотной системой, в которой возбуждается бесконечное множество резонансных частот. Исследования показали, что в подобном резонаторе могут возбуждаться несколько противофазных и несколько синфазных мод с достаточно высокими электродинамическими параметрами.

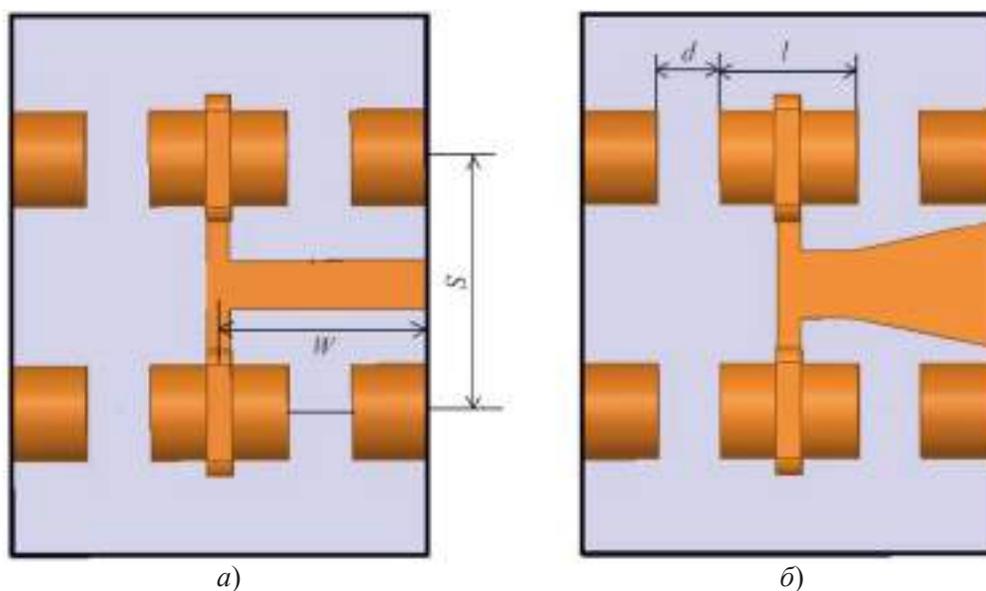


Рис. 3. Два конструктивных варианта ДКФР:

a – с четвертьволновым опорным стержнем; *б* – с четвертьволновым опорным стержнем конической формы

В исследуемом резонаторе низшим видом колебаний является противофазный (π) вид. На этой моде индуктивными элементами являются опорный стержень и резонансные «ветви», на которых закреплены центральные пролетные электроды. Емкостная часть зависит от числа двойных ВЧ-зазоров, их геометрических размеров. Кроме π -вида колебаний в резонаторе могут возбуждаться синфазные моды (2π), частота которых определяется в основном внутренним объемом резонатора. Геометрические размеры ДКФР выбирались из условия получения высоких электронных и электродинамических параметров. В табл. 1 приведены основные размеры резонатора.

Таблица 1

Основные параметры резонатора

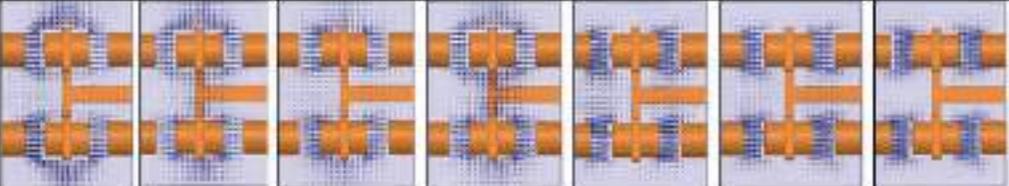
Параметр	Значение	
Длина резонатора, мм	A	19,5
Ширина резонатора, мм	B	17
Высота резонатора, мм	H	13
Длина зазора, мм	d	2
Длина втулки, мм	l	4,35
Радиус пролетного канала, мм	a	1
Расстояние между каналами, мм	S	9
Смещение «ветви» относительно боковых крышек	W/H	6,5
Общее число каналов	N	4

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для трехмерного моделирования резонатора использован метод конечных элементов в частотной области. Были исследованы основные электродинамические параметры: резонансная частота, собственная добротность, характеристическое сопротивление. Результаты моделирования резонатора, представленного на рис. 3, а, в диапазоне до 15 ГГц приведены в табл. 2.

Таблица 2

Электродинамические параметры резонатора, представленного на рис. 3, а

№ моды	1	2	3	4	5	6	7
Тип моды	π	π	π	π	2π	2π	2π
Резонансная частота f , ГГц	2,559	4,848	6,938	7,873	10,491	12,787	13,366
Собственная добротность Q	1370	1626	2687	2371	3612	4210	4333
Характеристическое сопротивление ρ , Ом	243	123	116	95	117	168	40
Картина поля в резонаторе							

В диапазоне до 15 ГГц спектр состоит из четырех частот противофазного типа (π) и трех синфазных мод (2π), которые расположены последовательно. Среди множества резонансных частот резонатора интерес в первую очередь вызывают те моды, которые имеют наибольшее характеристическое сопротивление и высокий коэффициент взаимодействия с электронным потоком. Следует отметить, что наибольшее характеристическое сопротивление наблюдается среди противофазных мод на низшей моде, среди синфазных мод на модах № 5 и 6.

Был также исследован вариант конструкции с коническим четвертьволновым опорным стержнем (рис. 3, б), в этом случае получают более высокие значения характеристического сопротивления и добротности на нескольких противофазных видах колебаний (табл. 3). Кроме того, такая конструкция имеет большую механическую прочность.

Для этой конструкции резонатора также можно отметить, что наибольшее характеристическое сопротивление среди противофазных мод наблюдается на низшей противофазной моде, для синфазных мод – на моде № 6.

Таблица 3

Электродинамические параметры резонатора, представленного на рис. 3, б

№ моды	1	2	3	4	5	6	7
Тип моды	π	π	π	π	2π	2π	2π
Резонансная частота, ГГц	2,774	4,964	6,947	7,892	10,655	12,776	13,512
Собственная добротность Q	1520	1476	2575	2024	3601	4133	4266
Характеристическое сопротивление ρ , Ом	376	169	119	115	116	129	63
Картина поля в резонаторе							

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТ

Проведено исследование перестройки резонансных частот резонатора с помощью перестроечных элементов для двух случаев. Первый вариант – две симметрично расположенные на корпусе резонатора тонкие металлические пластины, размещенные в поперечном направлении резонатора (рис. 4, табл. 4), второй вариант – перестройка резонатора с коническим опорным стержнем с помощью стержня прямоугольного сечения, который соединен с противоположной стенкой резонатора и ступенчато изменяется по длине (рис. 5, табл. 5). На рис. 4, б и 5, б также показано расположение перестроечных элементов.

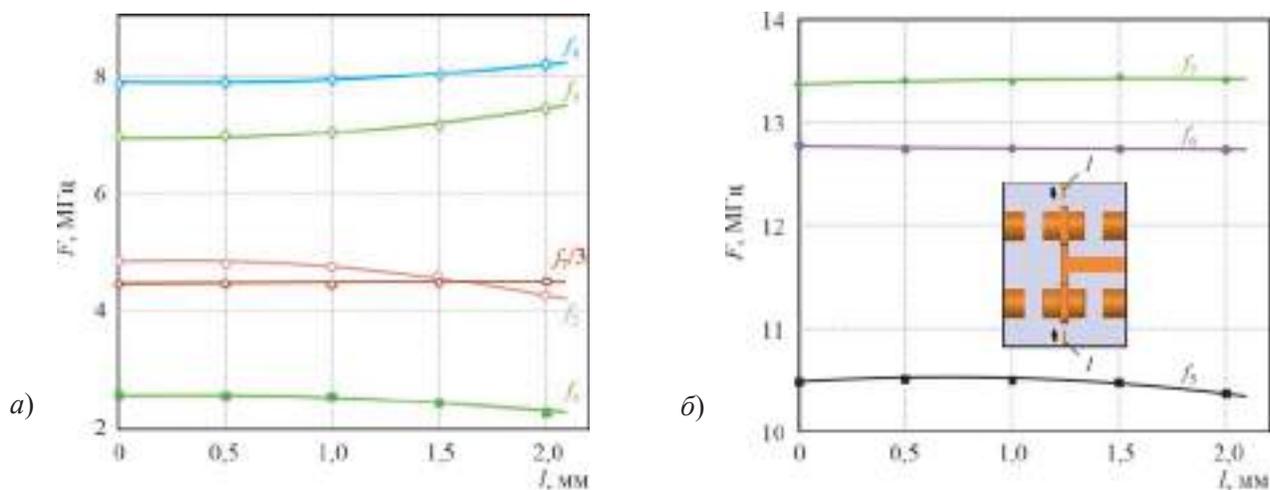


Рис. 4. Зависимости резонансных частот резонатора от ширины перестроечных элементов для случая перестройки пластинами, расположенными в поперечном направлении резонатора:

а – π -моды; б – 2π -моды

Таблица 4

Изменение частот резонатора при перестройке пластинами, расположенными в поперечном направлении резонатора

№ моды	1	2	3	4	5	6	7
Смещение частоты, %	11	12,3	6,9	6,9	1,3	0,3	0,5

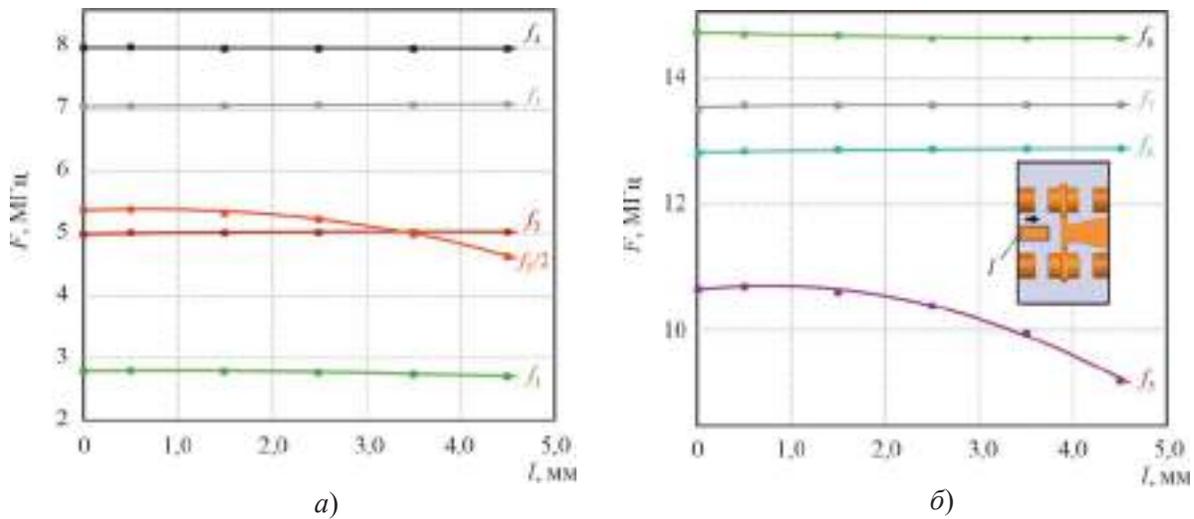


Рис. 5. Перестройка конического резонатора стержнем прямоугольного сечения:
 а – π -моды; б – 2π -моды

Таблица 5

Изменение частот резонатора при перестройке стержнем прямоугольного сечения

№ моды	1	2	3	4	5	6	7
Смещение частоты, %	2,9	1,3	0,6	0,2	14	0,7	0,4

По результатам исследования перестройки частот резонатора поперечными пластинами можно отметить следующее: максимальное смещение частот наблюдается на π -модах, особенно на № 1 и 2; на синфазных модах смещение частот проявляется слабее. В этом случае можно наблюдать кратность частот, равную 3, на модах № 7 и 2 при ширине перестроечных пластин 1,66 мм.

Во втором случае перестройки частот резонатора использовался метод введения в объем резонатора стержня прямоугольного сечения, закрепленного на боковой стенке. Таким образом, большей чувствительностью к изменению длины элемента перестройки (14 %) обладает синфазная мода № 5. Низший противофазный вид позволяет получить 2,9% перестройки частоты. В этом случае также, как и при перестройке поперечными пластинами, наблюдается кратность резонансных частот, но с отношением частот $f_3/f_2 = 2$.

5. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА

В работе выполнен расчет также электронных параметров резонатора: коэффициента взаимодействия с электронным потоком M и относительной электронной проводимости G_e/G_0 – для основных исследованных типов колебаний (рис. 6, 7). Для вычисления электронных параметров использовался известный метод Вессель-Берга [12].

На рис. 6 приведены зависимости параметров M и G_e/G_0 от ускоряющего напряжения в диапазоне 2...6 кВ.

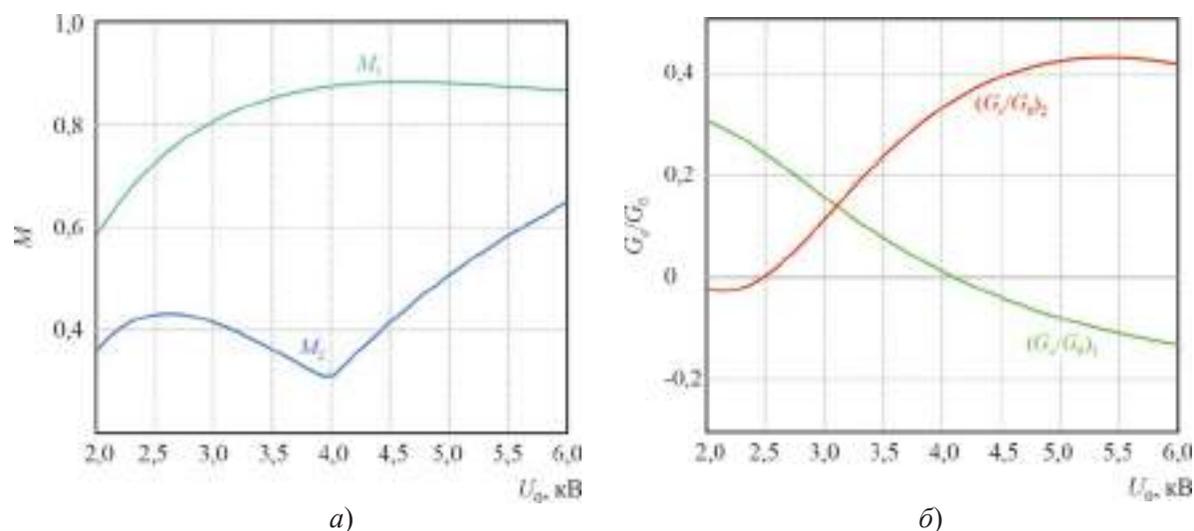


Рис. 6. Зависимость коэффициента взаимодействия M (а) и относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 (б) от ускоряющего напряжения U_0 для мод № 1 и 2

Среди всех исследованных мод наибольшее значение коэффициента взаимодействия в «низковольтном» режиме (до 6 кВ) наблюдается на противофазной моде № 1. Для этой моды оптимальным является напряжение порядка 3...3,8 кВ. При этом обеспечивается высокий коэффициент взаимодействия и одновременно присутствует положительная активная шунтирующая электронная проводимость G_e/G_0 , что обеспечивает режим работы прибора без самовозбуждения. У моды № 2 в этом диапазоне напряжений коэффициент взаимодействия существенно меньше. У более высоких по частоте мод коэффициент взаимодействия меньше 0,3 и на графиках не показан. В диапазоне напряжений 8...14 кВ (рис. 7) мода № 2 обеспечивает высокий коэффициент взаимодействия ($>0,8$), при этих же напряжениях синфазная мода № 5 обеспечивает удовлетворительное значение M (около 0,6). Остальные моды не обеспечивают высоких значений коэффициента взаимодействия.

На рис. 7 приведены зависимости параметров M и G_e/G_0 от ускоряющего напряжения в диапазоне 8...14 кВ.

Это дает возможность использовать режим настройки на кратные частоты для мод № 2 и 5. Режим кратности резонансных частот рассчитывался для конструкции ДКФР, представленной на рис. 3, б, с перестроочным элементом в виде стержня прямоугольного сечения (рис. 5, б). При настройке ДКФР на кратные резонансные частоты возможно дополнительное повышение электронного КПД клистрона [13].

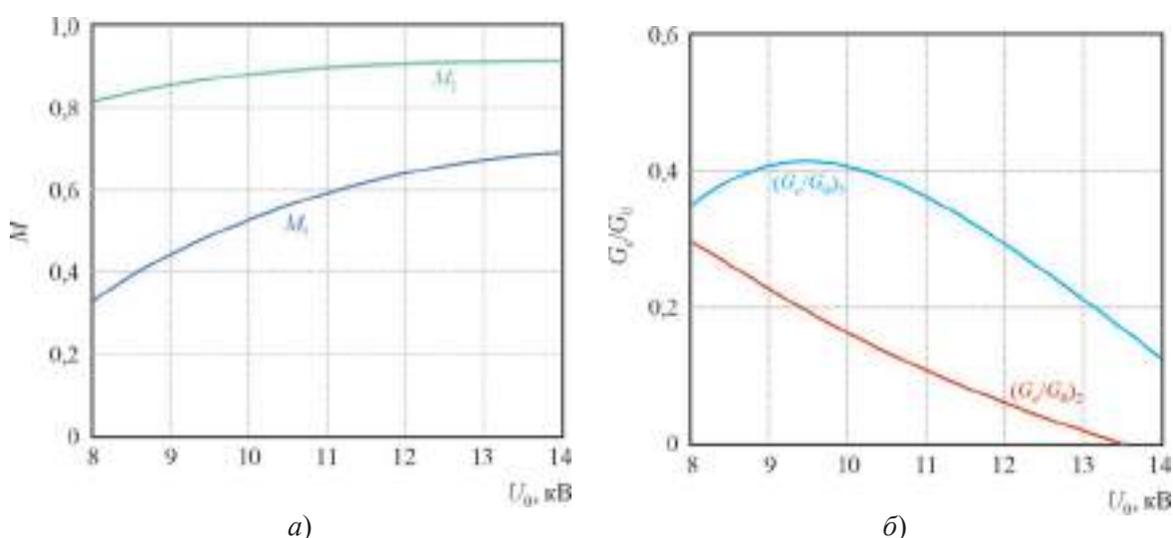


Рис. 7. Зависимость коэффициента взаимодействия M (а) и относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 (б) от ускоряющего напряжения для мод № 2 и 5

Для режима кратности частот на модах № 2 и 5 оптимальным значением ускоряющего напряжения будет 11...12 кВ, при котором относительная электронная проводимость G_e/G_0 имеет положительное значение.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована новая конструкция четырехлучевого двухзазорного квазифрактального призматического резонатора для приборов клистронного типа. В качестве основного метода исследований резонатора выбран метод численного математического моделирования. Проведено исследование основных электродинамических параметров резонатора. Найден и исследован ряд резонансных частот с синфазным и противофазным распределением высокочастотного электрического поля. Показано, что ряд противофазных и синфазных частот обладают повышенным характеристическим сопротивлением. Для работы клистрона в качестве умножителя частоты, а также для повышения КПД клистрона в режиме несинусоидальной модуляции изучен режим работы на кратных резонансных частотах. Для режима кратности частот подбором длины элемента перестройки удалось получить кратность резонансных частот, равную двум и трем.

Произведен расчет электронных параметров резонатора, таких, как коэффициент взаимодействия и относительная электронная проводимость. Рассчитанные зависимости электронных параметров позволяют выбрать величину ускоряющего напряжения для конкретной конструкции прибора.

На основе предложенного ДКФР могут быть созданы высокоэффективные, малогабаритные и простые по конструкции СВЧ-генераторы и усилители сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, работающие в одно- и многочастотном режимах. Такие источники микроволновой энергии могут найти применение в радиолокации, системах связи, дистанционного зондирования, навигации, медицине.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белоус, А. И.** СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия: в 2 кн. / А. И. Белоус, М. К. Мерданов, С. В. Шведов. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 728 с.
2. **Гельвич, Э. А.** Тенденции развития мощных усилителей и генераторов электромагнитных колебаний СВЧ в отечественной радиоэлектронике / Э. А. Гельвич // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ техника. – 1995. – Вып. 1 (465). – С. 27 – 44.
3. High-power, high-efficiency klystrons for industrial heating / Arai Shintaro, Maruyama Yoshifumi, Tomikawa Kunihiro, Makino Toshimoto // NEC Res. and Dev. – 1995. – Vol. 36, No 3. – P. 400 – 405.
4. **Motta, C.** Development of a 2450 MHz, 50 kW CW klystron / C. Motta, D. Lopes, J. Takahashi // 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – Monterey, California, USA, 2018. – P. 245 – 246.
5. **Fan, J.** A 14 kW high-power X-band to Ka-band klystron frequency multiplier / J. Fan, Y. Wang // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No 6. – P. 1854 – 1858.
6. Development of the S-band high power klystron with bandwidth of 12 % / Y. Wang, J. Zhang, Y. Wang, Z. Zhang // 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – Bangalore, India, 2011. – P. 33 – 34.
7. **Bearzatto, C.** Advantages of multiple beam klystrons / C. Bearzatto, M. Bres, G. Faillon // ITG Fachbericht. – Garmisch Partenkirchen, 1992. – P. 45.
8. **Пугнин, В. И.** Оценка предельной мощности многолучевых клистронов с резонаторами на основном виде колебаний для современных РЛС / В. И. Пугнин // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 43 – 50.
9. **Царев, В. А.** Исследование режима двухмодового взаимодействия полей фрактального двухззорного резонатора с электронами в многолучевом клистроне / В. А. Царев, А. И. Корчагин, А. Ю. Мирошниченко // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 12. – С. 9 – 12.
10. **Мирошниченко, А. Ю.** Двухззорные резонаторы фрактального типа / А. Ю. Мирошниченко, В. А. Царев, А. И. Корчагин // Журнал «Антенны». – 2011. – № 11. – С. 63 – 67.
11. **Пат. 7482994 США.** Three-dimensional H-fractal bandgap materials and antennas / Wen W., Sheng P., Hou B. – 2009.
12. **Chodorow, M.** A high-efficiency klystron with distributed interaction / M. Chodorow, T. Wessel-Berg // IRE Trans. on Electron Devices. – 1961. – Vol. 8. – P. 44 – 55.
13. **Korolev, A.** 20 MW pulse amplifier klystron with multiple frequency two gap bunching resonators for linear electron accelerators / A. Korolev, A. Mamontov, K. Simonov // Proceedings of EPAC. – Genoa, Italy, 2008. – P. 529 – 531.

Статья поступила 3 апреля 2023 г.

УДК 53.082.79

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ
ПЕРСПЕКТИВНОГО КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МОЩНОСТИ СИГНАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ
И ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА**

И. И. Столяров

АО «Российский институт радионавигации и времени», г. Санкт-Петербург

Приведено обоснование актуальности исследования взаимосвязи мощности сигнала возбуждения и выходных характеристик квантового стандарта частоты на основе анализа бюджетов нестабильностей стандартов различных типов. Представлена динамическая имитационная модель перспективного атомно-лучевого стандарта частоты с лазерной накачкой и детектированием, разработанная в программной среде Matlab. Определены требования к точности и диапазону системы автоматической регулировки мощности сигнала возбуждения.

КС: квантовый стандарт частоты, имитационное моделирование, динамическое моделирование, мощность сигнала возбуждения

**THE DYNAMIC SIMULATION MODEL
OF A PROMISING QUANTUM FREQUENCY STANDARD
FOR INVESTIGATING THE INTERCONNECTION BETWEEN
THE EXCITATION SIGNAL POWER AND THE OUTPUT CHARACTERISTICS
OF THE DEVICE**

I. I. Stolyarov

JSC «Russian institute of radionavigation and time», Saint-Petersburg

The relevance substantiation of investigating the interconnection between the excitation signal power and the quantum frequency standard output characteristics is given on the basis of the analysis of the budgets of standards instability of various types. A dynamic simulation model of a prospective atomic beam frequency standard with laser pumping and detection, developed in the Matlab software environment, is presented. The requirements for the accuracy and range of adjustment of the automatic power control system are defined.

Keywords: quantum frequency standard, simulation model, dynamic simulation, excitation signal power

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокостабильные выходные сигналы квантовых стандартов частоты (КСЧ) в настоящее время широко используются в различных областях науки и техники [1]. Повышение требований к современным техническим системам обуславливает постоянный процесс совершенствования этого типа устройств и поиск перспективных направлений развития. Одним из таких направлений является применение лазерных технологий для подготовки и детектирования в атомно-лучевых стандартах частоты. Применение данной технологии позволяет компенсировать некоторые негативные эффекты в работе КСЧ, что в свою очередь вместе с повышением точности и стабильности стандарта приводит к большему относительному вкладу эффектов, ранее не принимавшихся в расчет.

Для определения актуальных направлений повышения характеристик КСЧ необходимо рассмотреть примеры бюджетов нестабильностей различных типов современных стандартов частоты отечественного и зарубежного производства [2, 3], а также погрешностей и относительных сдвигов частот [4, 5]. Для наглядного представления бюджеты в графическом виде представлены на рис. 1 (для удобного масштаба на рис. 1, *a* и *г* не показаны вклады квадратичного эффекта Зеемана). Использование лазеров для подготовки и детектирования атомов, кроме повышения характеристик стандарта за счет увеличения интенсивности атомного пучка, в то же время приводит к возникновению сдвига, вызванного влиянием рассеянного света (на графиках обозначен как «световой сдвиг»), который в некоторой степени может быть снижен за счет оптимизации мощности и ширины линии лазерного излучения.

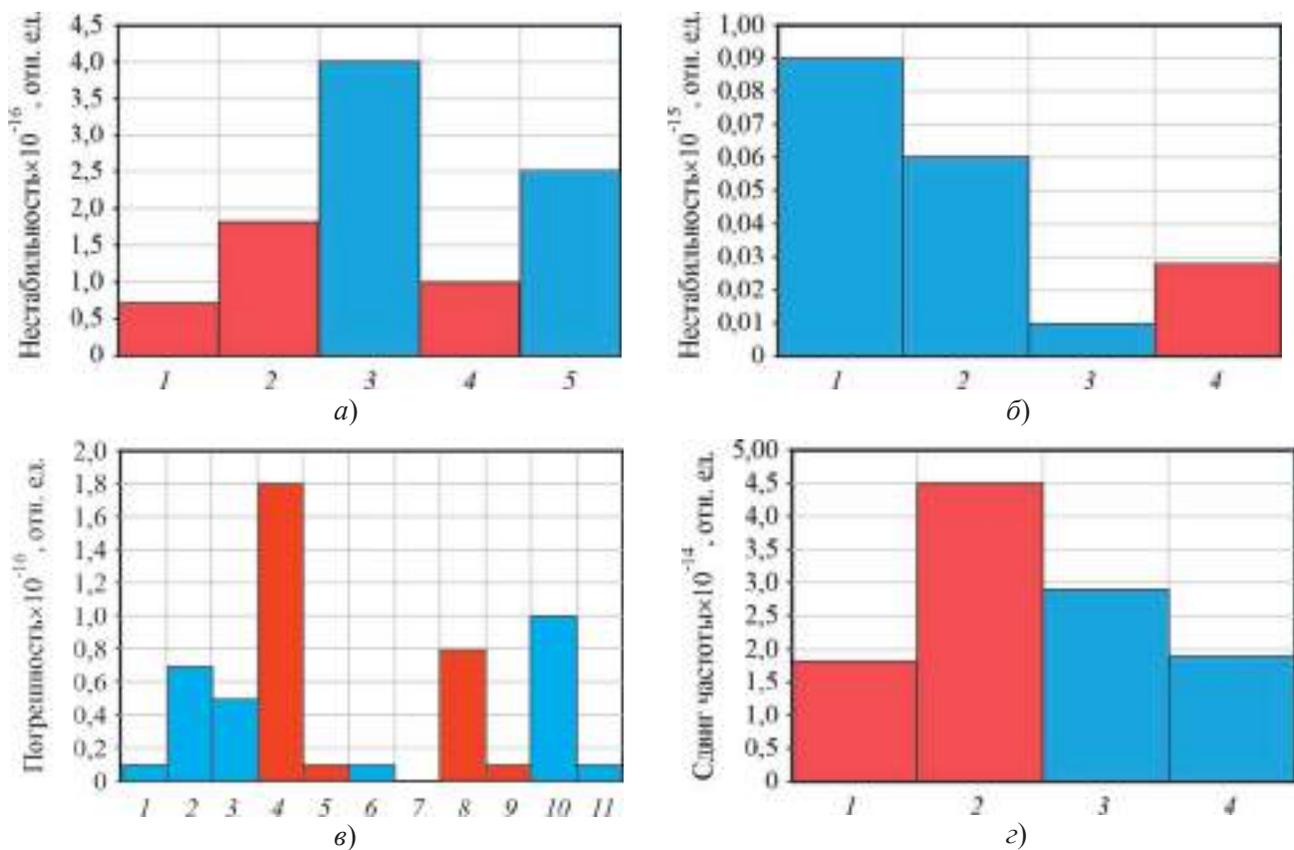


Рис. 1. Бюджет нестабильностей миниатюрного цезиевого КСЧ АЛТ, Пекинский университет (*a*) (1 – затягивание резонатора, 2 – затягивание Раби, 3 – световой сдвиг, 4 – квадратичный доплеровский сдвиг, 5 – излучение абсолютно черного тела); бюджет нестабильностей рубидиевого КСЧ фонтанного типа, ВНИИФТРИ (*б*) (1 – квадратичный эффект Зеемана, 2 – излучение абсолютно черного тела, 3 – гравитационный эффект, 4 – затягивание резонатора); бюджет погрешностей цезиевого КСЧ фонтанного типа, ВНИИФТРИ (*в*) (1 – квадратичный эффект Зеемана, 2 – излучение абсолютно черного тела, 3 – гравитационный сдвиг, 4 – зависимость от мощности СВЧ-сигнала, 5 – затягивание резонатора, 6 – чистота спектра зондирующего сигнала, 7 – световой сдвиг, 8 – градиент фазы в основном СВЧ-резонаторе, 9 – микроволновая утечка, 10 – линзовый эффект, 11 – столкновения с остаточным газом); относительные сдвиги частоты КСЧ с лазерной накачкой Пекинского университета (*г*) (1 – затягивание резонатора, 2 – затягивание Раби, 3 – световой сдвиг, 4 – сдвиг абсолютно черного тела)

Большой вклад в общую нестабильность также вносят эффекты излучения абсолютно черного тела (электромагнитное тепловое поле, которое излучают тела с температурой, отличной от нуля) и гравитационный эффект (зависимость частоты резонанса от гравитационного потенциала) – для компенсации соответствующих сдвигов вносятся поправки к значению частоты резонанса. Влияние квадратичного эффекта Зеемана (зависимость сдвига частоты от параметров магнитного поля в пролетной области) снижают, поддерживая однородность и стабильность этого поля посредством тщательного экранирования устройства от внешних полей и регулировки магнитной индукции, определяемой по разности частот соседних переходов.

Значительный вклад квадратичного доплеровского сдвига (зависимость частоты от скорости атомов пучка) компенсируется внесением соответствующей поправки. Необходимо отметить, что распределение скоростей атомов, совершивших рабочий переход, зависит в том числе от значения мощности сигнала возбуждения (СВ) и от фактического значения рабочей температуры источника атомного пучка, а следовательно, величина квадратичного доплеровского сдвига непосредственно зависит от стабильности этих параметров.

Отдельная группа негативных эффектов связана с качеством изготовления резонатора и синтезатора частоты (СЧ): чистота спектра СВ, затягивание резонатора (несоответствие собственной частоты резонатора и частоты рабочего атомного перехода), утечки микроволнового поля из областей взаимодействия. Влияние данных факторов и эффекта затягивания Раби (наложение линий соседних атомных переходов) может быть снижено посредством оптимизации мощности СВ [6]. Нестабильность мощности СВ, а также все эффекты, отрицательное влияние которых возможно снижать, управляя этой величиной, выделены на графиках красным цветом. Очевидно, что в совокупности данная группа эффектов вносит значительный вклад в выходные характеристики КСЧ в каждом из представленных типов стандартов. Кроме того, важное значение имеет тот факт, что, несмотря на компенсацию совокупного сдвига резонансной частоты внесением соответствующих поправок, параметры явлений, вызывающих данные сдвиги, динамически изменяются, соответственно меняется и суммарный сдвиг частоты, ухудшая характеристики стандарта.

Исследования общих закономерностей работы КСЧ обычно проводятся при допущении о моноскоростном атомном пучке. В работах же, непосредственно затрагивающих вопрос влияния мощности СВ на работу КСЧ, отечественных и зарубежных авторов [7–9] для описания скорости атомов используется модифицированное распределение Максвелла с ограничениями по скоростям для КСЧ с магнитной селекцией. При этом выходной сигнал детектора рассчитывается путем интегрирования вероятности совершения атомного перехода по скорости (базовая модель) и соответственно получают усредненные результаты, не учитывающие неопределенности, вызванные стохастическим характером скорости атомов пучка.

Кроме того, увеличение требуемых сроков использования КСЧ ведет к необходимости учитывать также динамику изменений мощности СВ и рабочей температуры источника атомного пучка, непосредственно влияющей на распределение скоростей, в том числе под влиянием внешних воздействующих факторов (ВВФ) среды функционирования устройства. Для исследования этих взаимосвязей, а также для определения требований к точности и диапазону регулировки мощности СВ с целью последующей разработки системы автоматической регулировки мощности была разработана имитационная модель перспективного цезиевого атомно-лучевого стандарта частоты с лазерной накачкой и детектированием с динамическим заданием параметров работы блоков.

При разработке данной модели было сделано несколько допущений: об абсолютной точности настройки частоты СВ и об отсутствии негативного влияния частотной модуляции на параметры выходного сигнала СЧ. Кроме того, производить оценку взаимосвязи рассматриваемых параметров удобно по выходному сигналу квантового дискриминатора (КД), как например сделано в работе [10], не включая в модель систему автоматической подстройки частоты и кварцевый генератор. С одной стороны, такой подход позволяет абстрагироваться от негативного вклада этих блоков, с другой стороны, по выходному сигналу возможно оценить параметр качества, определяющий предельную стабильность частоты КСЧ, одну из важнейших выходных характеристик стандарта.

2. БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим вначале основные закономерности функционирования КСЧ, необходимые для разработки модели, с целью исследования взаимосвязей характеристик стандарта с мощностью СВ. Вероятность совершения рабочего атомного перехода в атомно-лучевом КД для данных длин области взаимодействия l и пролетной области L при постоянной скорости атомов v определяется по формуле, приведенной в работе [1]:

$$P = 4 \sin^2 \theta \sin^2 \frac{\alpha l}{2v} \left(\cos \frac{(\omega_0 - \omega)L}{2v} \cos \frac{\alpha l}{2v} - \cos \theta \sin \frac{(\omega_0 - \omega)L}{2v} \sin \frac{\alpha l}{2v} \right)^2, \quad (1)$$

где $\sin \theta = b/\alpha$; $\alpha = [(\omega_0 - \omega)^2 + b^2]^{1/2}$; $\cos \theta = (\omega_0 - \omega)/\alpha$; ω_0 и ω – частоты атомного перехода и СВ соответственно.

Параметр возбуждения b , характеризующий мощность СВ и соответствующий магнитной составляющей B поля, формируемого в резонаторе, в свою очередь определяется, как в работе [11]:

$$b = g_j \mu_B B / 2\hbar, \quad (2)$$

где μ_B – магнетон Бора; \hbar – приведенная постоянная Планка; g_j – g -фактор Ландэ, для основного состояния цезия равный 2,00254032(20).

Функция вероятности скорости атома в пучке в КСЧ с лазерной накачкой и детектированием описывается модифицированным распределением Максвелла [6]:

$$p_v = C_n \frac{v_n}{v_{нв}^{n+1}} e^{-\left(v/v_{нв}\right)^2}, \quad (3)$$

где $v_{нв} = (2kT_{нап}/m)^{1/2}$ – наиболее вероятная скорость атома внутри источника; k – постоянная Больцмана; m – масса атома; $T_{нап}$ – рабочая температура источника пучка. Коэффициенты нормализации C_n и n выбираются в зависимости от количества используемых длин волн лазеров накачки и детектирования, для рассматриваемого случая с двумя лазерами $n = 2$ и $C_2 = 4/(\pi)^{1/2}$.

На основе приведенных выше математических формул разработана базовая модель исследования со статическим заданием параметров работы блоков стандарта. Полученные на основе данной модели графики зависимости амплитуды сигнала детектора от частоты СВ показаны на рис. 2. Здесь и далее значения выходного сигнала КД нормализованы таким образом, что максимальное значение принимается за единицу, а минимальное – за ноль. Из графиков видно, что при значениях мощности, отличных от оптимального, снижается амплитуда регистрируемого сигнала на центральной частоте и на уровне половины высоты, что соответственно снижает

отношение сигнал/шум и ухудшает выходные характеристики стандарта. Полученные значения полуширины $W_{1/2}$ резонансной линии: 1 – 726 Гц, 2 – 816 Гц, 3 – 584 Гц.

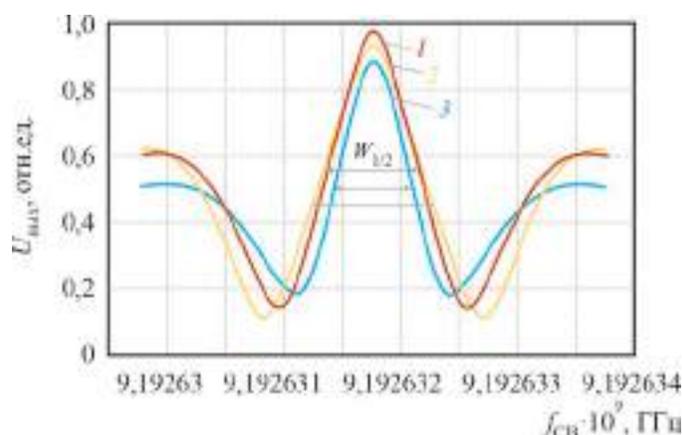


Рис. 2. Зависимости амплитуды выходного сигнала КД от частоты СВ для различных значений мощности СВ:

1 – оптимальное значение мощности ($P_{\text{опт}}$); 2 – $1,4P_{\text{опт}}$; 3 – $0,6P_{\text{опт}}$

Данная модель используется для непосредственного исследования основных закономерностей работы КСЧ и определения оптимального уровня мощности СВ для конкретной модели КД, но кроме решения этих задач возможен и другой способ применения. Представленную модель планируется использовать для исследований в следующем направлении: на основании анализа получаемых характеристик для различных значений девиации частоты может быть дополнена методика выбора параметров частотной модуляции.

3. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Для более точного представления реальной системы была разработана имитационная модель КСЧ с динамическим заданием параметров, структурная схема которой представлена на рис. 3. В отличие от рассмотренной выше базовой модели, результаты в данном случае определяются в том числе и случайным характером скорости V атомов пучка, генерируемого блоком ИАП (источник атомного пучка), разработанным с использованием метода обратного преобразования [12]: работа генератора ГПСЧ равномерно распределенных псевдослучайных чисел X_1 модифицируется посредством обратной функции от заданной функции распределения (3). Также ГПСЧ генерирует псевдослучайные числа $X_2 \dots X_4$, используемые в блоках модели для имитации процессов накачки и детектирования, взаимодействия с магнитным полем возбуждения атомного перехода.

Интенсивность атомного потока, формируемого ИАП, определяется рабочей температурой $T_{\text{ИАП}}$ источника пучка [13]:

$$I = \frac{1}{\kappa} \frac{n \sqrt{2kT_{\text{ИАП}} / m}}{4} S_{\kappa},$$

где $1/\kappa$ – коэффициент эффективности выходного канала ИАП; n – число атомов в единице объема; S_{κ} – площадь канала. В рассматриваемом случае начальное значение рабочей температуры задается равным 110 °С, при таких условиях атомный поток составляет приблизительно 10^{12} ат/с.

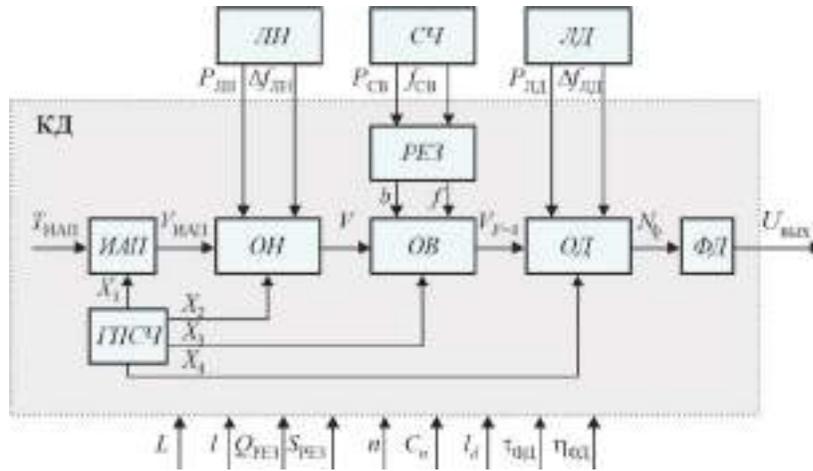


Рис. 3. Структурная схема разработанной модели КСЧ

Мощность СВ $P_{СВ}$, генерируемая синтезатором частоты СЧ, преобразуется в резонаторе РЕЗ, согласно формуле (2) и уравнениям Максвелла для волноводного резонатора [6], в параметр возбуждения b , передаваемый совместно со скоростью V в блок области взаимодействия ОБ, в котором для заданной частоты $f_{СВ}$ вычисляется вероятность рабочего атомного перехода $|F = 3, m_F = 0\rangle \rightarrow |F = 4, m_F = 0\rangle$ для каждого атома:

$$P = 4 \sin^2 \theta \sin^2 \frac{al}{2V} \left(\cos \frac{(\omega_0 - \omega)l}{2V} \cos \frac{al}{2V} - \cos \theta \sin \frac{(\omega_0 - \omega)L}{2V} \sin \frac{al}{2V} \right)^2. \quad (4)$$

В разработанной модели используются лазер накачки ЛН с длиной волны 852 нм, настроенный на переход D_2 -линии цезия $F = 4 \rightarrow F' = 3$, а также лазер детектирования ЛД, настроенный на переход $F = 4 \rightarrow F' = 5$. Мощность и ширина полосы лазерного излучения задаются параметрами $P_{ЛН}$ и $\Delta f_{ЛН}$ для ЛН и $P_{ЛД}$ и $\Delta f_{ЛД}$ для ЛД. В блоке области накачки ОН отсеивается часть атомов, не совершивших требуемый переход, возбуждаемый ЛН, – для таких атомов скорость V задается нулем. В области детектирования ОД поток атомов, совершивших рабочий переход, преобразуется в количество фотонов N_ϕ , испускаемых при циклическом переходе 4-5', возбуждаемом ЛД, за время $\tau_{ОД}$ нахождения в ОД. Время $\tau_{ОД}$ рассчитывается как отношение длины $l_{ОД}$ ОД к скорости $V_{F=4}$ атома, совершившего рабочий переход.

Поток фотонов, испускаемых детектированными атомами, интегрируется в соответствии с постоянной времени $\tau_{ФД}$ фотодетектора ФД, формируя выходной сигнал КД:

$$U_{\text{вых}} = \int_0^{\tau_{ФД}} (\eta_{ФД} q N_\phi + I_\tau + I_\phi) dt \cdot R_n, \quad (5)$$

где $\eta_{ФД}$ – квантовая эффективность ФД; q – заряд электрона; I_τ – темновой ток ФД; I_ϕ – фоновый ток, вызванный посторонним оптическим излучением; R_n – сопротивление нагрузки детектора.

Следующие параметры в модели задаются статически: нагруженная добротность $Q_{РЕЗ}$ (500) и площадь поперечного сечения резонатора $S_{РЕЗ}$ (10×23 мм²), длина ОБ l (10 мм), длина пролетного пространства L (150 мм) и длина ОД $l_{ОД}$ (5 мм). Кроме того, для моделирования использованы типичные значения параметров фотодетекторов Hamamatsu (например, модель S1337-1010BQ), используемых в подобных задачах: $\tau_{ФД}$ (3 мкс), $\eta_{ФД}$ (0,95), I_τ (200 пА).

Влияние стохастического характера скорости атомов в пучке и других процессов с наличием случайных составляющих можно видеть на графиках зависимости амплитуды выходного сигнала КД от частоты СВ, показанных на рис. 4.

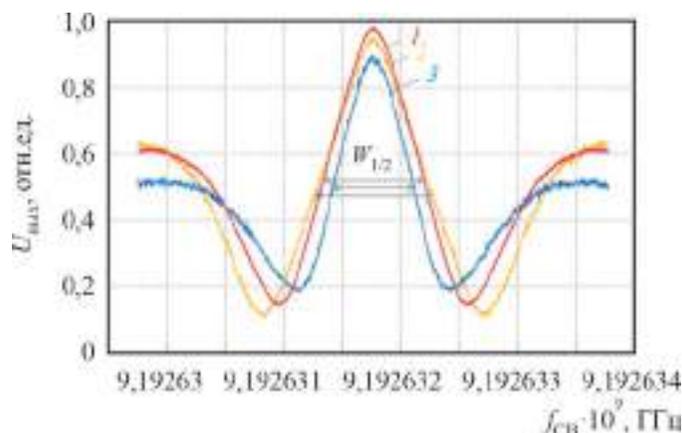


Рис. 4. Зависимости амплитуды выходного сигнала КД от частоты СВ для различных значений мощности СВ:

1 – оптимальное значение мощности ($P_{\text{опт}}$); 2 – $1,4P_{\text{опт}}$; 3 – $0,6P_{\text{опт}}$

Полученные значения полуширины $W_{1/2}$ резонансной линии, усредненные по 100 реализациям: 1 – 725 Гц, 2 – 816 Гц, 3 – 584 Гц. Отношение сигнал/шум для оптимального значения мощности СВ (случай 1) равно 47619, а соответствующий параметр качества $F = 65$. Отношение сигнал/шум для обоих случаев неоптимальной мощности меньше, а следовательно, уменьшается и значение параметра качества: 2 – 43, 3 – 54. Также стоит отметить, что по общему характеру получаемых графических результатов данная модель соответствует результатам существующих в рассматриваемой области практических исследований [14].

Графики зависимости выходного сигнала КД от мощности СВ, полученные усреднением по 100 реализациям, показаны на рис. 5. Цифрой 1 обозначен график для центральной частоты атомного перехода, цифрой 2 – для частоты, сдвинутой от центральной на 250 Гц (возможное значение девиации частоты при применении частотной модуляции), штриховой линией отмечены экстремальные значения функций, соответствующие оптимальным значениям $P_{\text{опт}}$ мощности СВ. Наклон графиков приблизительно равен 0,001 отн.ед./мкВт вблизи $P_{\text{опт}}$ и 0,004 отн.ед./мкВт при изменениях мощности более 40 % от оптимального значения.

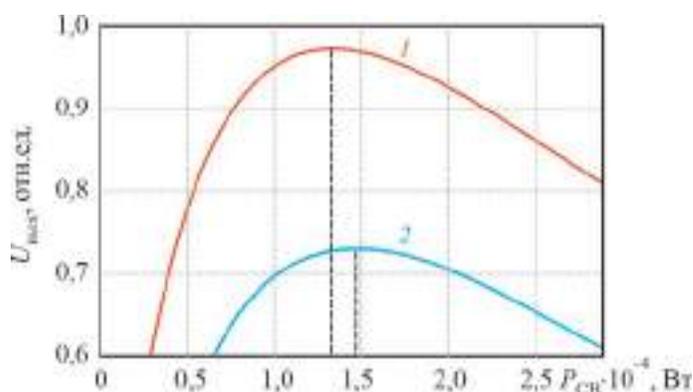


Рис. 5. Зависимости амплитуды выходного сигнала КД от мощности СВ

Исходя из полученных значений наклона графиков $U_{\text{вых}}(P_{\text{СВ}})$, отношений сигнал/шум и параметров качества, можно сделать следующий вывод: для определения оптимального значения мощности при проведении первоначальной настройки и поддержания отношения сигнал/шум на требуемом уровне в течение всего срока функционирования стандарта необходимо обеспечить возможность управления мощностью СВ с точностью не менее 5...10 мкВт.

Кроме определения особенностей работы КСЧ, связанных с мощностью СВ, в общем виде и для конкретных моделей КД, данную имитационную модель планируется применять и для разработки методов оптимизации функционирования КСЧ в условиях нестабильности мощности СВ под влиянием ВВФ агрессивной среды использования стандарта. Для исследований в данном направлении в рассматриваемой модели добавлена возможность динамического задания некоторых из параметров работы блоков КСЧ.

4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Современная тенденция к постоянному увеличению требуемых сроков использования КСЧ, в том числе в автономном режиме, без возможности периодической настройки устройства, ведет к необходимости учитывать долговременную динамику изменений параметров работы стандарта, вызванных негативным воздействием ВВФ. Одними из важнейших в рассматриваемой области являются показатели мощности СВ и формируемого им магнитного поля возбуждения, а также рабочая температура источника атомного пучка.

В разработанной модели КСЧ мощность СВ $P_{\text{СВ}}$, отклоняющаяся со временем от расчетного оптимального значения $P_{\text{опт}}$ по причине деградации элементов СЧ, задается в виде линейно убывающей функции, изменяющейся по закону:

$$P_{\text{СВ}}(t) = P_{\text{опт}} - k_p t, \quad (6)$$

где угловой коэффициент k_p определяет скорость изменения мощности за моделируемое время t функционирования стандарта частоты. Коэффициент k_p выбирается на основе анализа протоколов испытаний на ВВФ линейных стабилизаторов напряжения, от которых во многом зависит величина мощности СВ.

Рабочая температура $T_{\text{ИАП}}$ источника, от которой зависят интенсивность пучка и распределение скоростей атомов, динамически задается аналогичной линейно убывающей функцией:

$$T_{\text{ИАП}}(t) = T_0 - k_T t, \quad (7)$$

где T_0 – начальное значение; k_T – угловой коэффициент, определяющий скорость изменения температуры.

В качестве примера использования разработанной динамической имитационной модели КСЧ на рис. 6 показаны результаты проведенного моделирования для заданных параметров температуры ИАП и мощности СВ: $P_{\text{опт}} = 130$ мкВт, $k_p = 0,4 \cdot 10^{-7}$, $T_0 = 110$ °С, $k_T = 2 \cdot 10^{-3}$.

Цифрами 1 и 2 обозначены результаты для двух случаев: 1 – КСЧ с применением упрощенной модели системы автоматической регулировки мощности СВ и ИАП с постоянной рабочей температурой на всем интервале моделирования; 2 – КСЧ с динамически изменяющимися по обозначенным выше законам мощностью СВ и температурой ИАП. В данном случае 1 секунда времени моделирования принимается за $0,5 \cdot 10^6$ реальных секунд, тем самым полное время моделирования составляет около 15 лет непрерывного функционирования исследуемой модели стандарта частоты. Для данного случая диапазон регулировки мощности СВ, считая с запасом 100 %, составляет ± 100 мкВт.

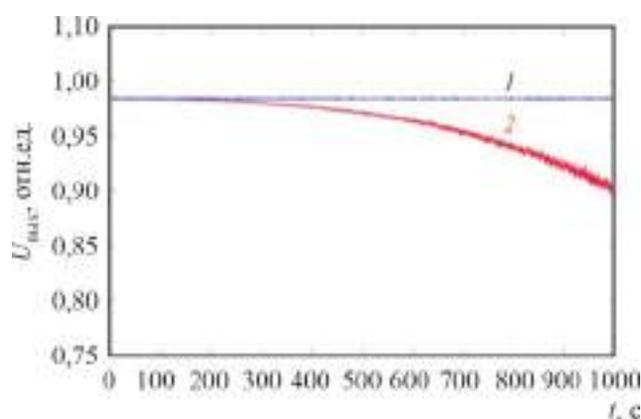


Рис. 6. Динамика изменений амплитуды выходного сигнала КД во времени

В зависимости от стойкости элементов СЧ к негативному влиянию ВВФ среды, с различной скоростью происходит отклонение мощности СВ от оптимального значения и соответствующее изменение выходного сигнала КД. Однако для общего случая очевидно, что для повышения метрологических характеристик КСЧ необходима разработка системы компенсации кратковременных и долговременных изменений мощности СВ, которая посредством регулировки данного параметра будет стабилизировать его вблизи оптимального значения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная динамическая имитационная модель разработана для исследования влияния мощности СВ и других параметров на выходные характеристики перспективного атомно-лучевого стандарта частоты с лазерной накачкой и детектированием. По результатам моделирования можно сделать вывод о важности учета случайных составляющих внутренних процессов и динамики изменений параметров работы КСЧ. В процессе исследований определены требования к точности и диапазону управления мощностью СВ в модели КСЧ для заданных параметров: необходимый диапазон регулировки составляет ± 100 мкВт от расчетного оптимального значения с точностью настройки не менее $5 \dots 10$ мкВт.

Кроме того, предполагается, что дальнейшие исследования в рамках данной тематики будут проводиться в следующих направлениях:

- детальная разработка и оценка параметров системы автоматической регулировки мощности СВ для современных перспективных атомно-лучевых КСЧ с целью повышения выходных характеристик устройства;
- оптимизация статических и динамических параметров системы автоматической регулировки мощности: диапазона и погрешностей измерений, точности и стабильности регулировки, температурной стабильности;
- определение влияния динамики внутренних факторов КСЧ на оптимальное значение мощности СВ и процесс ее стабилизации: потери и разность фаз в резонаторе, наличие боковых составляющих в спектре СВ, затягивание Раби.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Риле, Ф.** Стандарты частоты. Принципы и приложения / Ф. Риле; перевод с английского Н. Н. Колачевского. – М.: Физматлит, 2009. – 512 с.
2. Frequency instability of a miniature optically pumped cesium-beam atomic frequency standard / W. Xie, Q. Wang, X. He [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2020. – No 91. – 074705.
3. Бюджет неопределённости рубидиевого репера частоты фонтанного типа: результаты предварительных исследований / Д. С. Купалов, В. Н. Барышев, И. Ю. Блинов [и др.] // Измерительная техника. – 2021. – № 10. – С. 28 – 33.
4. Бюджет неопределённости цезиевого репера частоты фонтанного типа / И. Ю. Блинов, А. И. Бойко, Ю. С. Домнин [и др.] // Измерительная техника. – 2017. – № 1. – С. 23 – 27.
5. Research on main kinds of frequency biases of optically-pumped cesium beam frequency standard / W. Xie, X. He, S. Fang [et al.] // China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings. – 2020. – Vol. II. – P. 391 – 399.
6. **Vanier, J.** The quantum physics of atomic frequency standards / J. Vanier, C. Audoin. – Philadelphia: IOP Publishing, 1989. – 1351 p.
7. Controlling the microwave amplitude in optically pumped cesium beam frequency standards / C. Audoin, F. Hamouda, L. Chassagne, R. Barillet // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 1999. – No 2 (46). – P. 407 – 413.
8. **Пименов, А. В.** Распространение цезиевого атомарного потока в атомно-лучевой трубке с оптической накачкой на входе в СВЧ-резонатор и магнитным селектором на выходе / А. В. Пименов, С. А. Плешанов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 4 (507). – С. 16 – 23.
9. Цезиевая атомно-лучевая трубка с лазерной накачкой / Е. Н. Каневский, М. П. Лещенко, В. А. Мазеев [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 66 – 72.
10. Особенности построения схемы формирования сигнала возбуждения сверхвысокой частоты в цезиевых атомных часах / А. А. Петров, Д. В. Залетов, В. В. Давыдов, Д. В. Шаповалов // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 285 – 290.
11. On the power dependence of extraneous microwave fields in atomic frequency standards / S. R. Jefferts, J. H. Shirley, N. Ashby [et al.] // Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. – 2005. – P. 105 – 110.
- 12w. **Вадзинский, Р. Н.** Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. – СПб: Наука, 2001. – 295 с.
13. **Рамзей, Н.** Молекулярные пучки / Н. Рамзей; перевод с английского под редакцией Б. П. Адыяевича. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 412 с.
14. Высокостабильный синтезатор частоты для измерения характеристик цезиевой атомно-лучевой трубки / А. С. Котов, А. В. Хромов, С. М. Захаров [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2012. – Вып. 4 (515). – С. 8 – 19.

*Статья поступила 19 октября 2022 г.,
после переработки – 1 июня 2023 г.*

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 666.3

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, Н. С. Карасёв, А. А. Смирнова

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

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработана и производится широкая номенклатура керамических материалов. Они составляют основу электровакуумных, твердотельных и комплексированных устройств СВЧ. Совместно с развитием технологии изготовления материалов развивается направление измерения их электрофизических параметров. Авторами статьи была поставлена задача рассмотреть существующие в АО «НПП «Исток» им. Шокина» методики измерения свойств керамических материалов и дать представление о техническом уровне проводимых измерений.

КС: СВЧ-параметры, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, методики измерения

SOME METHODS FOR MEASURING THE PROPERTIES OF CERAMIC MATERIALS

V. M. Kolomin, V. N. Rybkin, N. S. Karasev, A. A. Smirnova

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

JSC «RPC «Istok» named after Shokin» has developed and produced a wide range of ceramic materials. They form the basis of electrovacuum, solid-state and integrated microwave devices. Together with the development of materials manufacturing technology, the direction of measuring their electrophysical parameters is developing. The authors of the article set the task to consider the existing methods of measuring the properties of ceramic materials in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» and to give an idea of the technical level of the measurements being conducted.

Keywords: microwave parameters, dielectric permittivity, dielectric loss tangent, measurement techniques

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроники неразрывно связано с разработкой новых материалов с необходимым функционалом. Однако создание материалов невозможно представить без непосредственного исследования их электрофизических свойств [1–3]. Для этого необходимо обеспечить наличие точных методик измерения параметров материалов и изделий из них. Основными требованиями, предъявляемыми к приборам для исследования керамических материалов, являются простота в эксплуатации, высокая производительность и точность, возможность проведения измерений без разрушения образца.

Качество расчета устройств, работающих в СВЧ-диапазоне и использующих различные керамические материалы, зависит от точности измерения их характеристик. В настоящее время нет единой стандартизированной методики измерения параметров большинства керамических материалов. В АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработан комплекс керамических материалов для различных применений и для отдельных групп материалов разработаны уникальные методики. Каждая методика измерения электрофизических свойств имеет некоторые особенности в подготовке образцов. Ключевыми характеристиками методик являются пределы измерений и значения погрешности измерений. Выбор методики измерения в основном определяется величиной диэлектрической проницаемости и технологией производства, определяющей возможные размеры образца. Решение вопроса проведения измерений параметров разработанных в АО «НПП «Исток» им. Шокина» керамических материалов носит частный характер и освещение некоторых способов измерения является актуальной задачей.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРОВ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Бурное развитие областей применения АФАР для бортового аэрокосмического и наземного назначения привело к повышению требований к электрическим и массогабаритным характеристикам изделий, входящих в её состав. Важнейшими элементами таких систем являются многослойные керамические платы (МКП), изготовленные по технологии ЛТСС. МКП по технологии ЛТСС имеют высокую (до 250 МПа) прочность, высокую относительно печатных плат теплопроводность (до 4 Вт/(м·К)) и низкие диэлектрические потери на СВЧ, а значения КТР такой керамики близки к значениям КТР основных полупроводниковых материалов, используемых в качестве ГИС. Благодаря таким свойствам МКП по технологии ЛТСС получили широкое применение в качестве основы конструкции для СВЧ-схем, НЧ-микросхем и различных ГИС. Такое широкое применение способствовало развитию технологии производства, а также методик контроля параметров как готового изделия МКП, так и керамики с металлизационными пастами.

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» совместно с ООО «НПП Дельта-Пасты» разработана отечественная система керамика-металлизационные пасты для производства изделий по технологии ЛТСС. Разработанная керамика получила название стеклокерамический материал (СКМ). Электрические свойства СКМ, который является основой МКП по технологии ЛТСС, представлены ниже.

Электрические свойства СКМ (на частоте 10 ГГц)

Диэлектрическая проницаемость ϵ	7,2±0,2
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$	<15·10 ⁻⁴

Знать диэлектрические свойства керамики необходимо при проектировании МКП по технологии ЛТСС, но также важно контролировать диэлектрические свойства керамики при производстве.

Для контроля свойств СКМ сотрудниками ФГУП «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» разработан стенд, общий вид которого приведен на рис. 1, а.

На основании 1 расположены корпуса 2 и 3, внутри которых расположены отрезки круглых волноводов. Левый отрезок волновода 4 является подвижным, перемещается вдоль оси волновода поворотом ручки 5 и поджимается пружиной к правому отрезку волновода 6. Испытуемая

подложка 7 располагается между отрезками волноводов, удерживается между ними механическим зажатием и при исследовании на однородность перемещается вручную. Зазор между отрезками волноводов и толщина подложки определяются по индикатору часового типа 8. Излучатели H_{01} -типа располагаются внутри отрезков волновода по оси и включаются в измерительный тракт с помощью коаксиальных разъёмов 9. Для регулировки связи излучателей с резонирующей областью подложки они могут перемещаться вдоль оси волноводов вращением маховичков 10. Отсчет расстояния от подложки до излучающего элемента излучателей производится по линейкам. Призмы 11 служат для опоры элементов СВЧ-тракта.

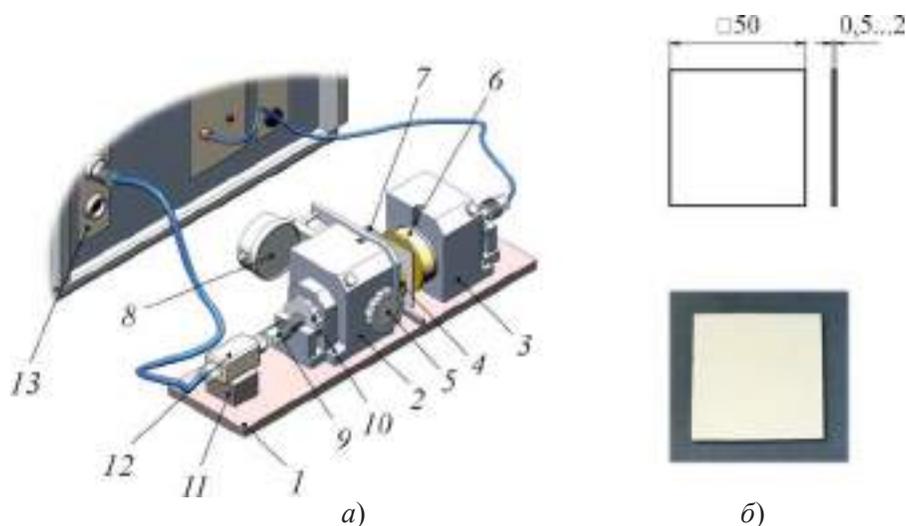


Рис. 1. Общий вид стенда РВД (а) и измеряемого образца (б):

- 1 – основание; 2 – левый корпус; 3 – правый корпус; 4 – левый отрезок волновода; 5 – ручка;
 6 – правый отрезок волновода; 7 – испытуемый образец (подложка); 8 – часовой индикатор;
 9 – коаксиальный разъем; 10 – маховик; 11 – опорная призма; 12 – процессор цифровой
 обработки сигналов; 13 – измеритель модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-18

Измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь проводятся на образцах, имеющих плоскую форму (рис. 1, б), методом «волноводно-диэлектрических резонансов», который является разновидностью метода «вариации частоты и типов колебаний». Данный метод основан на измерении резонансной частоты и добротности собственного электромагнитного колебания системы H_{01} -типа, состоящей из двух соосных отрезков круглого запердельного волновода с плоскими металлическими фланцами и расположенной между ними испытуемой диэлектрической подложки. Возбуждение колебаний H_{01} -типа производится подвижными излучателями специальной конструкции. Расчет диэлектрических характеристик испытуемого образца производят на персональном компьютере из решения трансцендентного уравнения для собственных колебаний системы, полученного на основе решения электродинамической задачи для данной модели. Представленный способ измерения позволяет проводить измерения на керамических образцах, полученных методом литья пленки, что оптимально для СКМ.

Характеристики метода

Диапазон частот измерений.....	9 – 11 ГГц
Пределы измерений ϵ (с погрешностью $\pm 2\%$).....	4 – 12
Пределы измерений $\text{tg}\delta$ (с погрешностью $\pm 15\%$).....	$(20 – 200) \cdot 10^{-4}$
Измеряемые материалы.....	СКМ (ЛТСС)

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Диэлектрический резонатор (ДР) представляет собой керамическую деталь определенной конфигурации (чаще всего цилиндрической), в которой электромагнитное поле ограничивается пространством вокруг диэлектрика на границе диэлектрик-воздух.

ДР позволяют создать простую схему СВЧ-генератора, отлично включаются в полосковые линии, относительно просты в изготовлении, имеют небольшую массу и габариты, устойчивы к механическим и акустическим воздействиям. Они komponуются и позволяют создавать фильтры в широком диапазоне частот. В АО «НПП «Исток» им. Шокина» был разработан комплекс резонаторных термостабильных керамических материалов: ЦТО (оксиды Zr, Sn, Ti), БЦНТ (оксиды Ba, Zn, Ni, Ta) и БСТ (оксиды Ba, Sm, Ti) – и ДР из них. Разработанные типы резонаторов характеризуются термостабильностью (ТКЧ), добротностью Q , имеют рабочий частотный диапазон от 2,5 до 40 ГГц и соответствуют мировому уровню (фирмы «Murata», Япония; «TransTech», США) [4, 5].

Электрические свойства материалов для производства диэлектрических резонаторов и подложек представлены в табл. 1.

Таблица 1

Электрические свойства материалов для ДР

Параметр	Значение
ЦТО	
Диэлектрическая проницаемость ϵ	42 ± 2 на частоте 10 ГГц
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$	$< 2,0 \cdot 10^{-4}$ на частоте 10 ГГц
БЦНТ	
Диэлектрическая проницаемость ϵ	30 ± 2 на частоте 10 ГГц
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$	$< 1,3 \cdot 10^{-4}$ на частоте 10 ГГц
БСТ	
Диэлектрическая проницаемость ϵ	78 ± 2 на частоте 5 ГГц
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$	$< 7,7 \cdot 10^{-4}$ на частоте 5 ГГц

Суть метода заключается в измерении резонансной частоты и геометрических размеров ДР. ДР помещают в измерительную ячейку, затем проводят измерение частоты. Диэлектрическая проницаемость определяется расчетным путем по формулам:

$$\epsilon = \left(\frac{253}{f_0(D^2L)^{1/3}} \right)^2 - \text{ для БСТ, } \epsilon = \left(\frac{271 \left(\frac{L}{D} + 0,14 \right)}{f_0L} \right)^2 - \text{ для БЦНТ,} \quad (1)$$

где f_0 – резонансная частота, ГГц; L – высота, мм; D – диаметр, мм.

При воздействии на керамический материал электрического поля поглощается некоторое количество электрической энергии. Эту энергию, затраченную на работу перемещения структурных элементов кристаллической решетки, называют диэлектрическими потерями [6]. Диэлектрические потери в керамическом материале, как и в других диэлектриках, сопровождаются нагревом материала. Величина этих потерь может быть значительна, и нагрев достигает такой степени, при которой электрический контур, включающий керамический диэлектрик, полностью расстраивается. Величину диэлектрических потерь принято оценивать по углу диэлектрических потерь δ или тангенсу этого угла $\operatorname{tg}\delta$. Углом диэлектрических потерь называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз θ между током и напряжением емкостной цепи.

Для расчета тангенса угла диэлектрических потерь необходимо провести измерения добротности. Для этого диэлектрический резонатор помещают в измерительную ячейку, проводят измерение резонансной частоты, затем измерения частоты при отстройке на -3 дБ и 3 дБ. Добротность вычисляют по формуле (2):

$$Q = f_0 / (f_1 - f_2), \quad (2)$$

где f_0 – резонансная частота, ГГц; f_1 – резонансная частота при отстройке на -3 дБ, ГГц; f_2 – резонансная частота при отстройке на 3 дБ, ГГц.

Тангенс угла диэлектрических потерь рассчитывают по формуле (3):

$$\operatorname{tg}\delta = 1 / Q. \quad (3)$$

На рис. 2, а представлен общий вид измерительной ячейки, а на рис. 2, б – внешний вид образца ДР. Представленный способ позволяет проводить измерения диэлектрических резонаторов в «точке» по частоте.

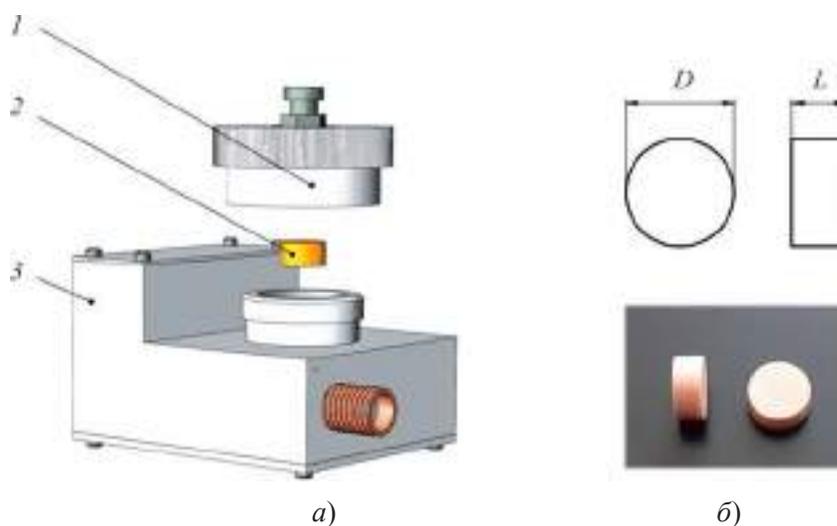


Рис. 2. Общий вид измерительной ячейки (а) и измеряемого образца (б):

1 – крышка измерительной ячейки; 2 – образец;
3 – корпус измерительной ячейки

Характеристики метода

Рабочая частота	2,5 – 20 ГГц
Пределы измерений ϵ (с погрешностью $\pm 10\%$).....	20 – 85
Пределы измерений $\text{tg}\delta$ (с погрешностью $\pm 10\%$).....	$(1,2 - 7,7) \cdot 10^{-4}$
Изменяемые материалы.....	ЦТО, БЦНТ, БСТ

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНО-ПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ

Основной вклад в значение $\text{tg}\delta$ вносит взаимодействие структурных элементов керамики с высокочастотным электрическим полем, наложенным на неё. Из всех возможных видов этого взаимодействия, следствием которого являются электронная, ионная, дипольная и другие виды поляризации, а также сквозная электропроводность, наиболее сильное влияние на величину потерь оказывает тепловая ионная поляризация [7]. Электрическое поле вносит в хаотическое тепловое движение ионов некоторый порядок, устанавливая определенную направленность переброса ионов. В результате этого в диэлектрике устанавливается асимметричное распределение зарядов, создающее некоторый электрический момент. Когда время установления тепловой ионной поляризации сравнимо с частотой поля, в котором помещен диэлектрик, создаются условия для наиболее эффективного поглощения мощности поля. Диэлектрическая проницаемость керамических материалов, как правило, возрастает с температурой и снижается при повышении частоты. С повышением температуры диэлектрическая проницаемость разных материалов меняется в разной степени. У кристаллов с прочными связями и малой поляризацией, в частности у корунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, при повышении температуры значение диэлектрической проницаемости изменяется незначительно. Легко поляризуемые кристаллы, наоборот, весьма чувствительны к температурным изменениям, например BaTiO_3 . Поэтому для разработки приборов на основе керамики ключевую роль играют изменения значений параметров керамики при изменении температуры. Коллективом авторов [8] разработана методика измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь с возможностью нагрева измерительной ячейки и самого образца для вакуумно-плотной керамики. Общий вид стенда представлен на рис. 3, а.

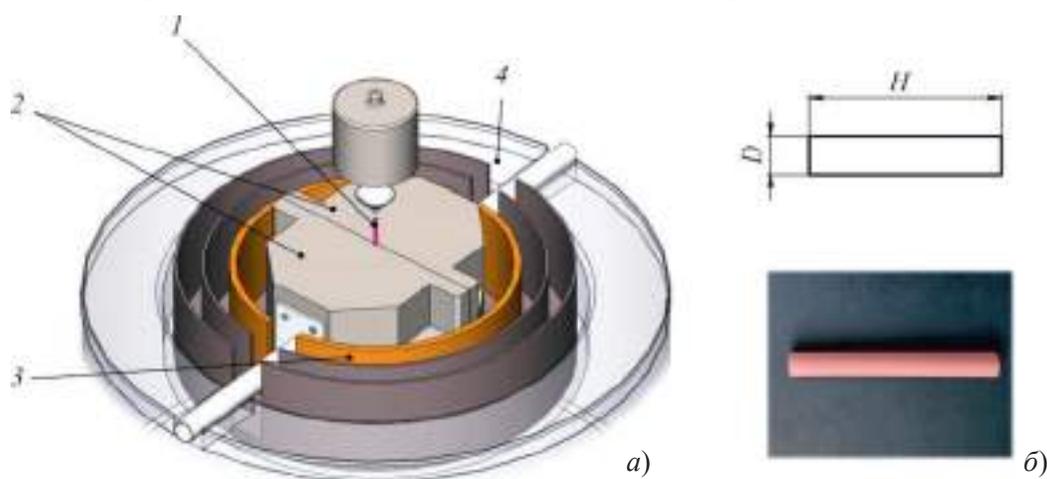


Рис. 3. Общий вид стенда УК-ДП (а) и измеряемого образца (б):
1 – образец; 2 – измерительный резонатор; 3 – нагревательный элемент; 4 – термостат

Характеристики метода

Рабочая частота	3 – 3,5 ГГц
Пределы измерений ϵ (с погрешностью $\pm 10\%$).....	2 – 50
Пределы измерений $\text{tg}\delta$ (с погрешностью $\pm 20\%$).....	$(0,1 - 0,7) \cdot 10^{-4}$
Измеряемые материалы.....	ВК-94-1, А-995, КТ-30, ВНА-99-2

Методика основана на применении цилиндрических резонаторов, возбуждаемых на волне типа H_{011} . При этом образцы представляют собой стержни длиной (65 ± 5) мм (рис. 3, б). В зависимости от диапазона значений измеряемой диэлектрической проницаемости материала стержень изготавливается определенного диаметра, согласно табл. 2.

Таблица 2

Размеры образцов в зависимости от диэлектрической проницаемости материала

ϵ	D , мм	H , мм
До 20	$3,5 \pm 0,05$	65 ± 5
От 20 до 50	$2,5 \pm 0,05$	65 ± 5

Модулированный по частоте СВЧ-сигнал от клистронного генератора, работающего на частоте 3,3 ГГц, после разветвления направленным ответвителем через развязывающие вентили подается на измерительный резонатор и перестраиваемый эхобокс. Прошедшие сигналы детектируются детекторными головками и подаются на индикаторный блок, развертка которого синхронна с пилообразным напряжением, модулирующим частоту генератора. На экране осциллографической трубки индикаторного блока наблюдается резонансная кривая и перемещаемая при перестройке эхобокса частотная метка, позволяющая измерять параметры резонатора: резонансную частоту f_0 и добротность Q_0 . При внесении в резонатор контролируемого керамического материала происходит сдвиг частоты Δf_0 и уменьшение Q_0 до Q , по которым определяются $\text{tg}\delta$ и ϵ . Для получения высокой чувствительности используется высокодобротный резонатор, возбуждаемый на волне E_{010} . Образец помещается в максимум электрического поля в центре резонатора. Резонатор представляет собой медные посеребренные полуцилиндры, которые стыкуются по плоскости, проходящей через ось симметрии, параллельно образующей, что исключает пересечение линий тока с разрывами в стенках.

Для проведения испытаний при температурах $+85$ и -60 °С предусмотрен термостат. Нагревательный элемент, управляемый специальным блоком, позволяет проводить измерения при нагреве. Для охлаждения до отрицательных температур используется жидкий азот.

5. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРОВ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Предлагаемые к рассмотрению в данной статье методики измерения позволяют производить измерения $\text{tg}\delta$ и ϵ в «точке» по частоте. Измерения параметров в прямоугольном волноводе имеют преимущество, которое заключается в возможности производить измерения в широком диапазоне частот. Дополнительным преимуществом является возможность проведения измерения магнитных материалов, поглощающих СВЧ паразитные колебания. Однако такая методика

имеет и недостаток: при заполнении волновода исследуемым материалом практически всегда присутствует воздушный зазор между исследуемым образцом и широкой стенкой волновода, что приводит к резкому скачку напряженности электрического поля при переходе из материала образца в воздух и сильно влияет на точность определения электромагнитных параметров [9]. Особенно это проявляется при измерении материалов с большим значением действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости [9]. В связи с этим в производстве керамических изделий методика используется в качестве оценки технологии их изготовления. Общий вид стенда представлен на рис. 4, а.

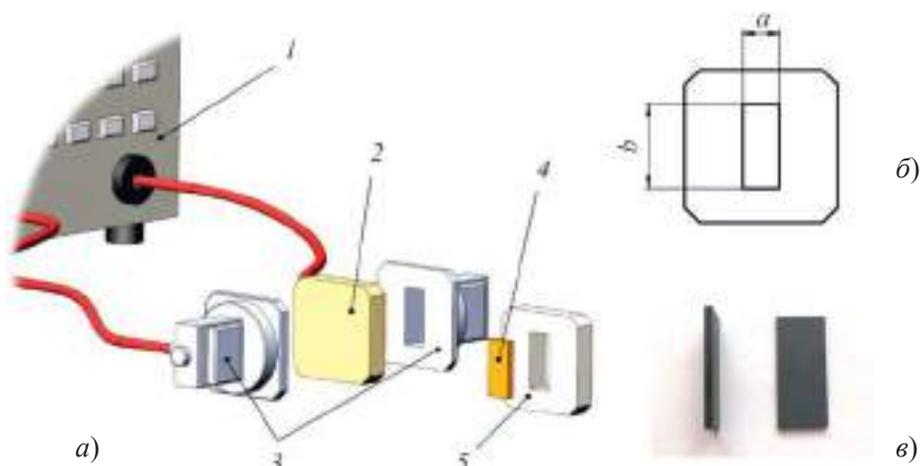


Рис. 4. Общий вид стенда (а), измерительной ячейки (б) и измеряемого образца (в):
 1 – векторный анализатор цепей Keysight Technol. E5071C; 2 – пластина КЗ; 3 – волноводы;
 4 – образец; 5 – измерительная ячейка

Перед проведением измерения проводится калибровка. Калибровка осуществляется в три этапа [10, 11]:

1. *Сквозное соединение.* Волноводы 3 соединяются между собой напрямую, после проводятся измерения при помощи векторного анализатора цепей 1. Результат сохраняется.

2. *Короткое замыкание.* Между волноводами 3 помещается пластина КЗ 2. Пластина КЗ имеет одну полированную сторону, которая последовательно помещается к каждому волноводу 3. Аналогично пункту 1 проводятся измерения с сохранением результатов.

3. *Калибровка без образца.* Между волноводами помещается измерительная ячейка 5 без образца 4. Проводятся измерения, аналогичные пунктам 2 и 3. Результат сохраняется. Стенд готов к измерениям.

Название способа измерения «Методика измерения в прямоугольном волноводе» подсказывает геометрическую форму образца и измерительной ячейки (рис. 4, б, в). В зависимости от требуемого для проведения измерения диапазона частот изменяются размеры исследуемого образца (табл. 3).

Таблица 3

Размеры образцов в зависимости от диапазона частот

Параметр	Значение		
Диапазон рабочих частот, ГГц	8 – 12	12 – 18	18 – 26
Габариты образца ($a \times b$), мм (допуск $\pm 0,05$ мм)	22,8 \times 10,1	15,8 \times 7,9	10,6 \times 4,2

Характеристики методики измерения в прямоугольном волноводе вызывают споры у специалистов в этой области. Они связаны с вопросом погрешности методики измерения. Известно, что при увеличении [12] значений диэлектрической проницаемости возрастает и погрешность измерений.

Характеристики метода

Рабочая частота.....	8 – 26 ГГц
Пределы измерений ϵ (с погрешностью $\pm 10\%$).....	1 – 100
Пределы измерений $\text{tg}\delta$ (с погрешностью $\pm 15\%$).....	$(0,1 - 0,7) \cdot 10^{-4}$
Измеряемые материалы.....	большинство номенклатуры керамических материалов

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены некоторые методики измерения контрольно-измерительной базы АО «НПП «Исток» им. Шокина». Методики были разработаны под конкретные материалы, поэтому имеют уникальные характеристики по диапазонам значений измерений, полосе частот и геометрическим размерам исследуемых образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Малышкина, И. А.** Основы метода диэлектрической спектроскопии: учебное пособие / И. А. Малышкина. – М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 80 с.
2. **Данилин, А. А.** Измерения в технике СВЧ: учебное пособие / А. А. Данилин. – М.: Радиотехника, 2008. – 184 с.
3. Диэлектрические резонаторы для изделий электронной техники СВЧ-диапазона: учебное пособие / В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, В. А. Иовдальский, И. А. Соколов. – М.: Курс, 2021. – 150 с.
4. Каталог компания «Murata» (Япония).
5. Каталог компания «Trans-Tech» (США).
6. **Балкевич, В. Л.** Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1968. – 199 с.
7. **Батыгин, В. Н.** Исследование и разработка алюмооксидной керамики для изготовления деталей и узлов электровакуумных СВЧ-приборов: дис. канд. техн. наук / В. Н. Батыгин; НПО «Исток». – Фрязино, 1962.
8. Контроль СВЧ-характеристик миниатюрных керамических поглотителей энергии / А. А. Анциферов, А. И. Афанасьев, В. Г. Бравинский [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1990. – Вып. 4 (428). – С. 49 – 51.
9. Волноводный метод измерений электромагнитных параметров материалов в СВЧ-диапазоне и оценка погрешности измерений / М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, И. С. Ерёмин [и др.] // Журнал Радиоэлектроники. – 2018. – № 9. – С. 1 – 19.
10. Руководство по эксплуатации векторного анализатора цепей «E5071C» Keysight Technologies.
11. Руководство по эксплуатации ПО «N1500A Materials Measurement Suite» Keysight Technologies.
12. Особенности измерения параметров керамики с высокой диэлектрической проницаемостью в прямоугольном волноводе / В. И. Алексеенков, Е. А. Богомолова, В. И. Васильев [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2022. – Вып. 2 (553). – С. 64 – 71.

Статья поступила 15 мая 2023 г.

УДК 621.371, 621.372

СОГЛАСУЮЩИЕ ПЛАВНЫЕ РУПОРНЫЕ АНТЕННЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

В. И. Васильев^{1,2}, О. А. Дьяконова¹, В. А. Насонов²

¹ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

²АО «НПП «Исток им. Шокина», г. Фрязино

Описаны исследования характеристик отражения плавных рупоров для корректного согласования стандартных волноводов со свободным пространством. Приведены результаты расчета коэффициента отражения от плавных рупоров по приближенным формулам и при численном моделировании. Проведена аттестация рупоров на автоматизированном комплексе для измерения электродинамических характеристик образцов материалов в диапазоне 37,5...78,9 ГГц.

КС: скалярный анализатор цепей, свободное пространство, коэффициенты прохождения и отражения, миллиметровые волны, рупор

MATCHING SMOOTH HORN ANTENNAS IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

V. I. Vasilyev^{1,2}, O. A. Dyakonova¹, V. A. Nasonov²

¹FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino

²JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The study of the reflection characteristics of smooth horns for correct matching of standard waveguides with free space is described. The results of calculating the reflection coefficients from smooth horns using approximate formulas and numerical simulation are presented. Horns were certified on an automated complex for measuring electrodynamic characteristics of material samples in the range of 37.5...78.9 GHz.

Keywords: scalar network analyzer, free space, transmission and reflection coefficients, millimeter waves, horn

1. ВВЕДЕНИЕ

При решении многих прикладных задач требуется измерять коэффициенты отражения и прохождения волн для образцов материалов в условиях, приближенных к свободному пространству. При измерении электродинамических характеристик на смену скалярным анализаторам цепей пришли векторные анализаторы различных модификаций, обладающие широкими возможностями. Одной из этих возможностей является пространственно-частотная обработка сигналов отражения и прохождения, что позволяет существенно понизить паразитный фон из-за отражения и переотражения в измерительном тракте и тем самым повысить точность измерений. Однако во многих практических случаях, где не требуется измерение очень малых коэффициентов отражения (менее -25 дБ), применение скалярных анализаторов цепей вполне оправдано, поскольку их цена значительно меньше, чем векторных анализаторов. В пользу применения скалярных анализаторов цепей дополнительным аргументом является их надежность и долговечность, и поэтому прибо-

ры серии P2 до сих пор используются во многих научно-исследовательских организациях [1, 2]. Недостатком приборов этой серии является большая трудоемкость измерений, которые проводятся вручную. В работе [3] эта проблема решена с помощью создания автоматизированного измерительного комплекса.

Целью данной работы является исследование характеристик нестандартных плавных рупорных антенн, которые согласуют стандартные волноводы со свободным пространством в миллиметровом диапазоне длин волн.

2. РУПОРНЫЙ МЕТОД

Для измерения коэффициентов отражения и прохождения в свободном пространстве миллиметровых волн основным остается рупорный метод [1–3], работающий в комплекте со скалярными анализаторами цепей.

Элементом согласования стандартных измерителей КСВН со свободным пространством является плавный рупор. Рупорные антенны, разработанные в ИРЭ РАН, трансформируют основную моду H_{01} прямоугольного волновода на входе рупора в квазиплоскую волну на его выходе. Плавность рупорного перехода обеспечивает малый уровень отражения (<-25 дБ) [3]. Ниже рассмотрим исследования плавных рупоров, работающих в комплекте с панорамными измерителями КСВН типов P2-68 и P2-69.

2.1. Согласующие рупоры

Согласующие рупоры (рис. 1) – нестандартные измерительные узлы, служащие для согласования измерительного тракта со свободным пространством.

Качество согласования характеризуется величиной коэффициента отражения от рупора. Эта величина определяется углом раскрыва β (в плоскости \vec{E}) и размерами выходной апертуры $A \times B$. Для обеспечения низкого уровня отражения угол раскрыва (в радианах) должен быть мал по сравнению с единицей, а размеры выходной апертуры – много больше длины волны.

Основные размеры рупора обозначены на рис. 2.

Расчёт величины коэффициента отражения R_0 (дБ) от рупора производится по асимптотической формуле (1), справедливой для малых углов раскрыва β и больших размеров выходной апертуры [1].

$$R_0 = 20 \lg \left| \frac{\beta}{4\pi \frac{b}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} + \frac{e^{-j(4\pi\lambda)} \int_0^l \sqrt{1 - \left[\frac{\lambda}{2a + 2(A-a)(z/l)} \right]^2} dz}{4\pi \frac{B}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2A}\right)^2}} \right|, \quad (1)$$

где z – ось рупора.



Рис. 1. Согласующий рупор

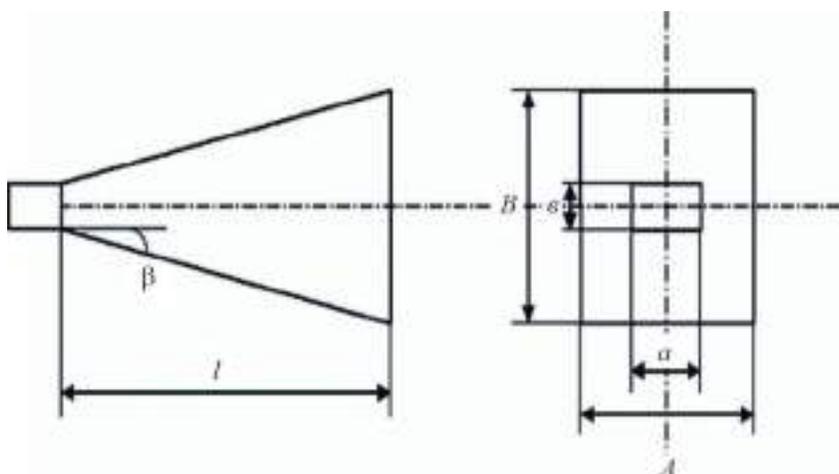


Рис. 2. Чертеж плавного согласующего рупора:

l – длина рупора; a – размер широкой стенки волновода; b – размер узкой стенки волновода

Первое слагаемое в формуле (1) соответствует отражению от излома стенок в канале рупора, а второе – от его выходной апертуры. Для обеспечения компромисса между вкладками в коэффициент отражения, вносимыми каждым слагаемым, размеры рупора целесообразно выбрать такими, чтобы эти слагаемые были близки по величине.

В работе использованы измерители КСВН. Соответствующие им поддиапазоны, длины волн, сечения волноводов и размеры рупорных антенн (длина и размер выходной апертуры) указаны в таблице.

Номер рупора	Тип панорамного измерителя КСВН	Рабочий диапазон длин волн, мм	Сечение волновода $a \times b$, мм	Выходная апертура рупора $A \times B$, мм	Длина рупора l , мм
1	P2-68	8,0 – 5,6	5,2 × 2,6	32 × 24	161
2	P2-69	5,6 – 3,8	3,6 × 1,8	32 × 24	172

Из формулы (1) получим выражения для максимального R_{p0} (2) и минимального R_{m0} (3) коэффициентов отражения (огibaющих для графиков на рис. 3 и 4).

$$R_{p0} = 20 \lg \left| \frac{\beta}{4\pi \frac{b}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} + \frac{1}{4\pi \frac{B}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2A}\right)^2}} \right|, \quad (2)$$

$$R_{m0} = 20 \lg \left| \frac{\beta}{4\pi \frac{b}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} - \frac{1}{4\pi \frac{B}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2A}\right)^2}} \right|. \quad (3)$$

Из формулы (2) видно, что при неизменной апертуре уменьшить максимальный коэффициент отражения можно, уменьшая угол β за счет увеличения длины l рупора. Или при постоянном угле β отражение можно уменьшить, увеличивая длину l рупора. При этом увеличиваются размеры апертуры и уменьшается второй член в формуле (2). В обоих случаях необходимо увеличивать длину рупора.

На рис. 3 представлена частотная зависимость модуля коэффициента отражения с верхней (красный цвет кривой) и нижней (черный цвет кривой) границей для рупора № 1, рассчитанная по приближенным формулам (1)...(3), с размерами, согласно таблице.

Аналогичные графики для рупора № 2 представлены на рис. 4.

Рис. 3. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения для рупора № 1

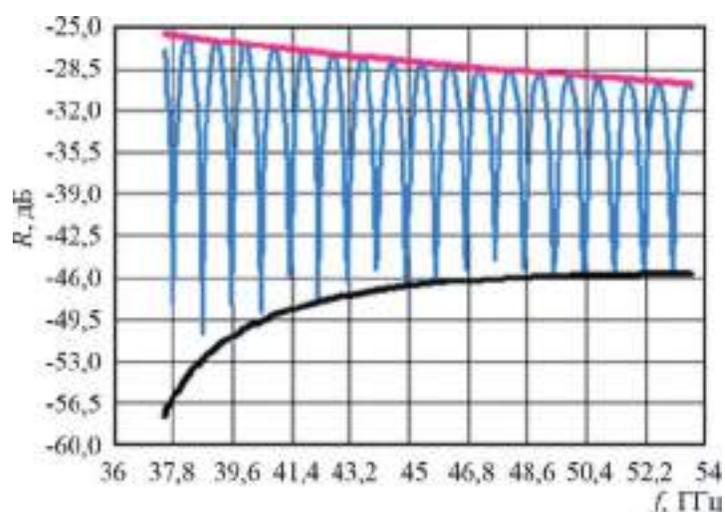
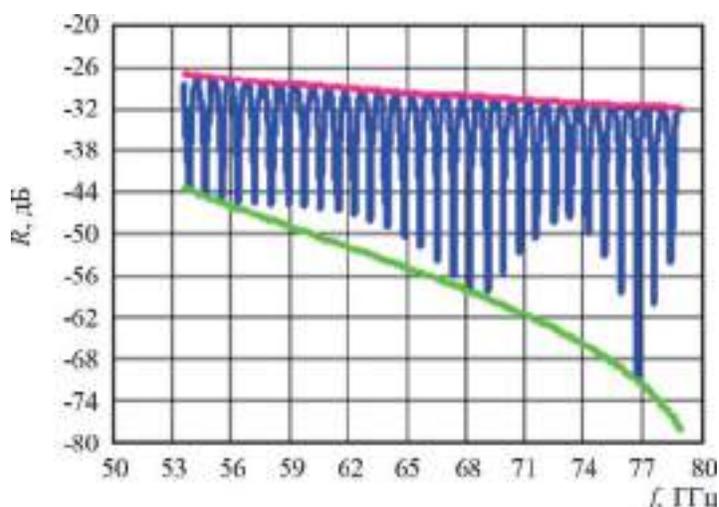


Рис. 4. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения для рупора № 2



Более точные значения для коэффициента отражения, учитывающие потери в медных стенках рупора, полученные с помощью программы CST, представлены на рис. 5 и 6.

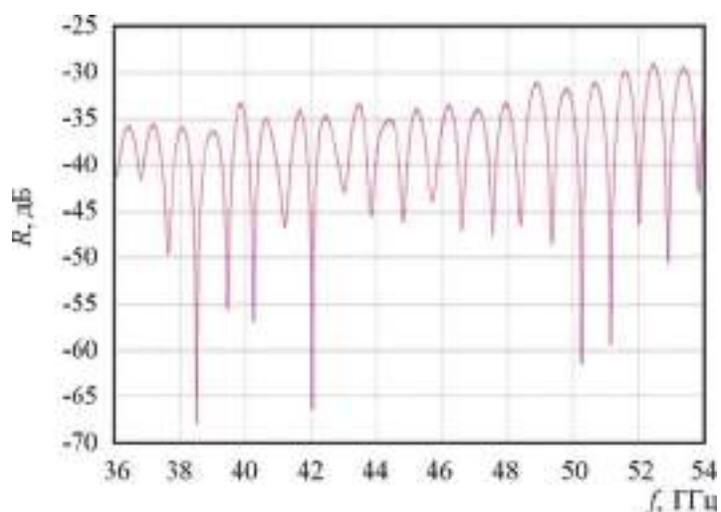


Рис. 5. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения для рупора №1, рассчитанная по программе CST

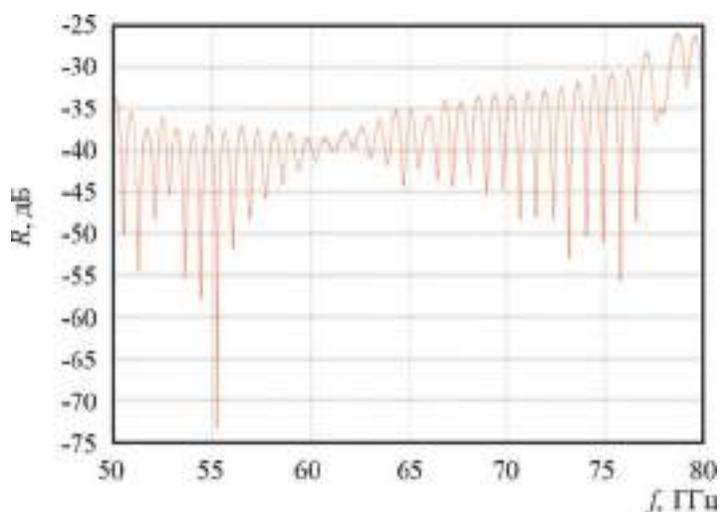


Рис. 6. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения для рупора № 2, рассчитанная по программе CST

На примере рупора № 1 покажем распределение поля \vec{E} в плоскости, параллельной широкой стенке возбуждающего рупор волновода (рис. 7).

Диаграмма направленности рупора № 1 изображена на рис. 8.

Аналогичная диаграмма направленности характерна и для рупора № 2.

Как и следовало ожидать, при плавном изменении сечения рупора поле в апертуре подобно полю H_{01} в возбуждающем волноводе.

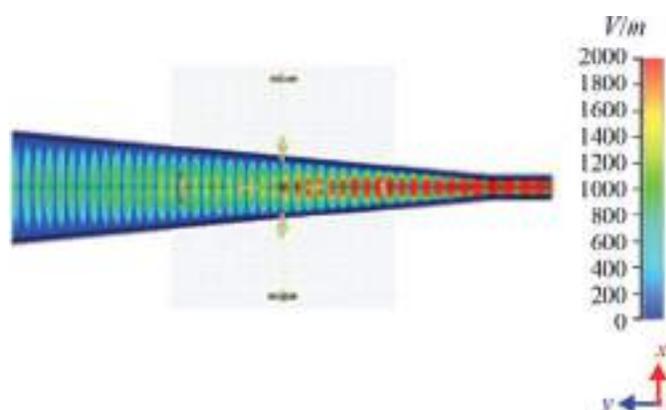


Рис. 7. Распределение поля \vec{E} в рупоре № 1

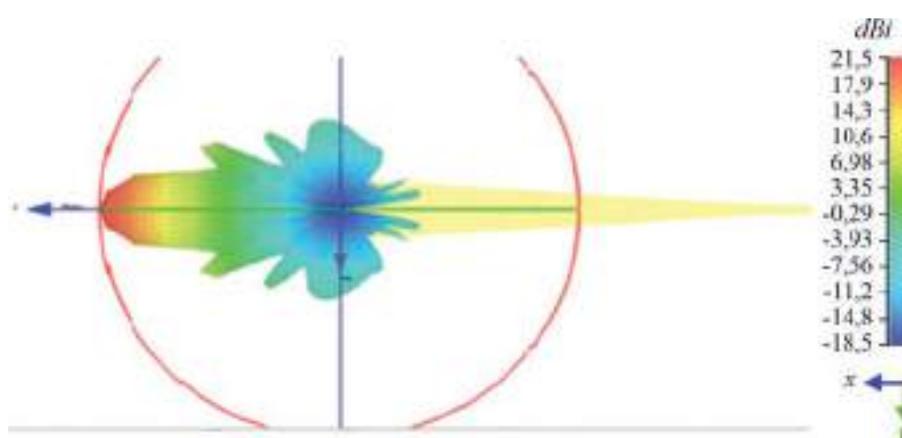


Рис. 8. Диаграмма направленности рупора № 1 в плоскости \vec{E}

2.2. Рупор с изломом

Незначительное усложнение формы рупора позволяет существенно уменьшить первое слагаемое в формуле (1). Этот модифицированный вариант рупора изображен на рис. 9. От приведенного на рис. 2 он отличается тем, что вместо одного излома каждой из широких стенок имеются два излома. Расстояния между изломами – $\lambda_g/4$, где $\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$.

В месте 2-го излома рупора сечение волновода мало меняется и максимальное отражение в середине диапазона частот приблизительно можно записать в виде:

$$R_{p0} = 20 \lg \left| \frac{\beta_1 - \beta_2}{4\pi \frac{b}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} + \frac{1}{4\pi \frac{B}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2A}\right)^2}} \right|. \quad (4)$$

На рис. 10 даны частотные зависимости модуля коэффициента отражения для плавного рупора (серый цвет кривой) и модифицированного рупора (зеленый цвет кривой).

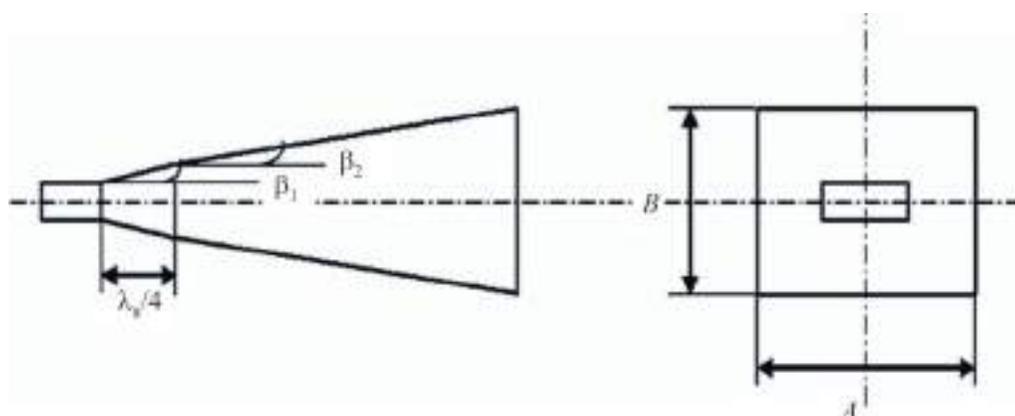


Рис. 9. Чертеж модифицированного согласующего рупора

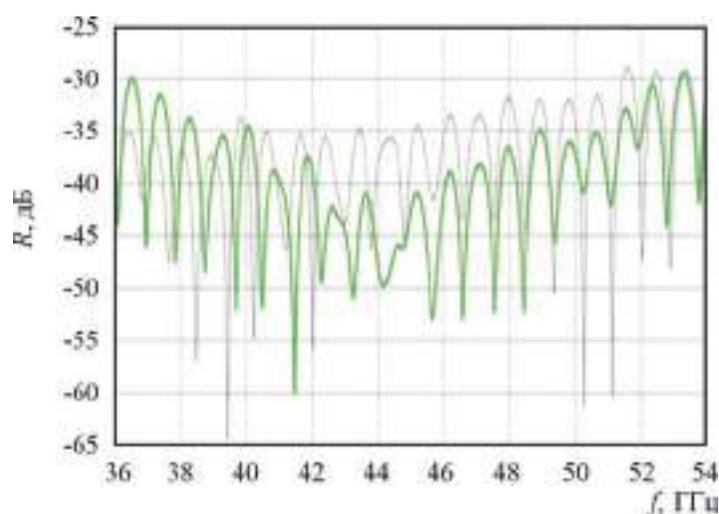


Рис. 10. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения для плавного и модифицированного рупоров, рассчитанные по программе CST

При равенстве углов β_2 и β_1 остается только отражение от апертуры рупора в полосе примерно 20 % (см. рис.10).

2.3. Аттестация плавных рупоров

Аттестация рупоров заключается в экспериментальной оценке величины коэффициента отражения в рабочем диапазоне панорамного измерителя КСВН, для работы с которым предназначен данный рупор. Измерения проведены на автоматизированном комплексе [3] для двух рупоров: № 1 и № 2.

Измерительная схема для аттестации рупоров приведена на рис.11.

Для каждого из двух поддиапазонов (см. таблицу) используется соответствующий отдельный генератор с комплектом стандартных направленных ответвителей с детекторами, собранных по схеме для измерения модуля коэффициента отражения от объектов. В качестве объекта исследования выступает плавный рупор. Измерительный блок является общим для всех поддиапазонов и через АЦП подключается к компьютеру. Измерения и обработка результатов эксперимента проходят в реальном времени.

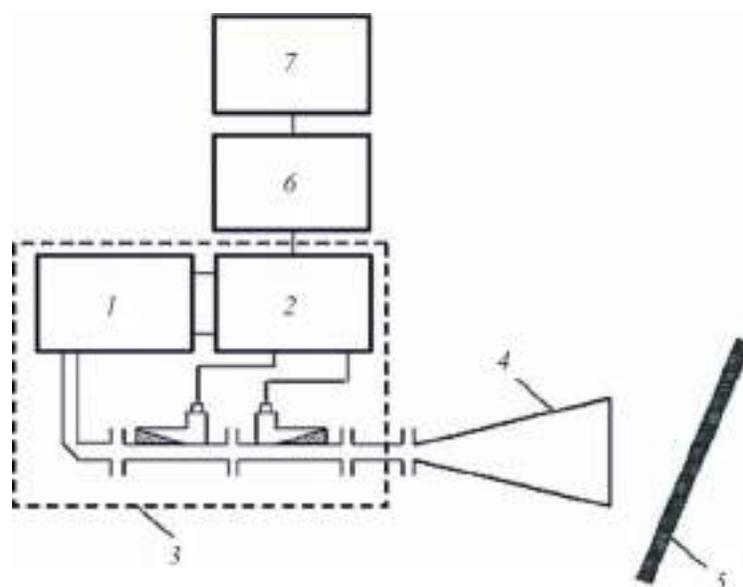


Рис. 11. Измерительная схема для аттестации рупоров:

1 – генераторный блок; 2 – измерительный блок (индикатор); 3 – панорамный измеритель КСВН;
4 – аттестуемый рупор; 5 – согласованная нагрузка; 6 – АЦП; 7 – компьютер

В качестве согласованной нагрузки используется лист поглощающего материала, например типа «Луч», с размерами, много большими выходной апертуры рупора, расположенный под углом 45° к оси рупора в зоне Френеля.

При небольших перемещениях (в пределах $1 \dots 2$ длин волн) и поворотах поглощающего листа картина отражений от рупора, воспроизводимая на экране панорамного измерителя КСВН, не должна существенно изменяться. Эта картина носит интерференционный характер, обусловленный наличием в рупоре двух центров отражений (начало и выходная апертура). Примеры такой картины для вариантов рупоров № 1 и 2 представлены на рис.12 и 13 соответственно.

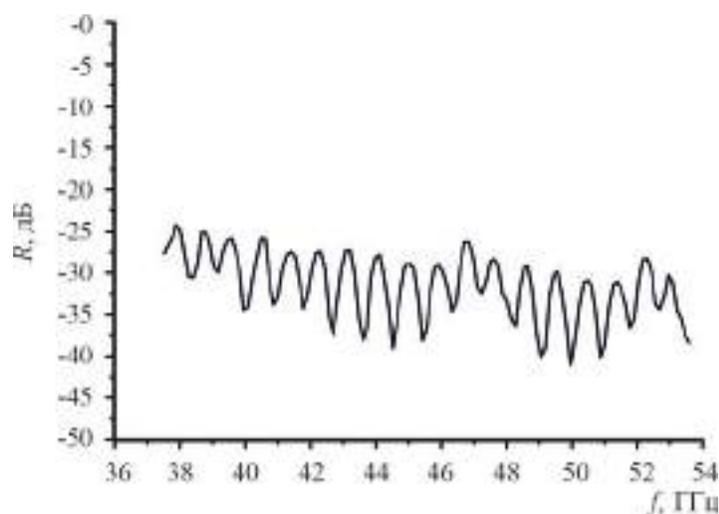


Рис. 12. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения от рупора № 1

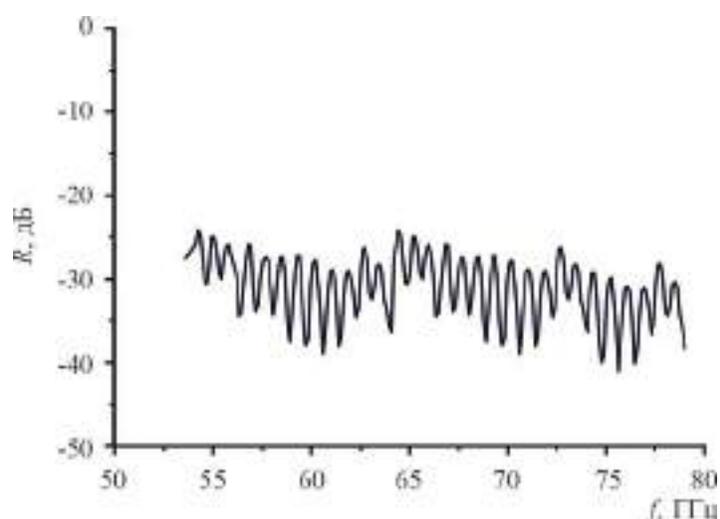


Рис. 13. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения от рупора № 2

Из приведенных графиков видно, что имеет место хорошее совпадение результатов расчета по приближенной формуле (см. рис. 3 и 4) и численного моделирования (см. рис. 5 и 6) с экспериментальными характеристиками (см. рис. 12 и 13), что подтверждает необходимую точность измерений коэффициента отражения до уровня $-25 \dots -30$ дБ.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты расчета модуля коэффициента отражения от плавных рупоров по приближенным формулам и численном моделировании.

Проведена аттестация рупоров на автоматизированном комплексе для измерения электродинамических характеристик образцов материалов в диапазоне $37,5 \dots 78,9$ ГГц.

Имеет место хорошее совпадение результатов расчетов и измерения. Плавность рупорного перехода обеспечивает малый уровень отражения (порядка $-25 \dots -30$ дБ).

Показано, что при плавном изменении сечения рупора поле в апертуре подобно полю H_{01} в возбуждающем волноводе.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы и установки для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых волнах / В. Н. Аплеталин, О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, В. С. Солосин // Измерительная техника. – 1991. – № 7. – С. 40 – 42.
2. Методы и средства для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волнах / О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, С. В. Маречек [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 2. – С. 51 – 57.
3. Дьяконова, О. А. Автоматизированный измерительный комплекс на основе комплекта скалярных анализаторов цепей / О. А. Дьяконова, Д. С. Каленов, Ю. Н. Казанцев // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2016. – № 10. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/10/text.pdf>.

Статья поступила 10 мая 2023 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.323

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНЫХ GaAs-ГЕТЕРОСТРУКТУР И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

С. Н. Карпов

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

Разработана феноменологическая одномерная квантово-механическая математическая модель для прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов на их основе. Представлены результаты моделирования характеристик транзисторных гетероструктур и полевых транзисторов на их основе, получено хорошее согласование с экспериментальными данными.

КС: GaAs-гетероструктура, поверхностная плотность электронов, напряжение перекрытия, эффективная подвижность электронов, ток насыщения, крутизна передаточной характеристики

METHOD FOR PREDICTING THE CHARACTERISTICS OF TRANSISTOR GaAs-HETEROSTRUCTURES AND HEMTs BASED ON THEM

S. N. Karpov

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

A phenomenological one-dimensional quantum-mechanical mathematical model has been developed to predict the characteristics of transistor GaAs-heterostructures and HEMTs based on them. The results of modeling the characteristics of transistor heterostructures and HEMTs based on them are presented, good agreement with experimental data is obtained.

Keywords: GaAs-heterostructure, electron surface density, overlap voltage, effective electron mobility, saturation current, transconductance of transfer characteristics

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основным материалом для изготовления СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов является арсенид галлия. Существующие технологии позволяют на GaAs-гетероструктурах изготавливать транзисторы мм-диапазона длин волн с повышенными значениями удельной мощности и коэффициента усиления. Ввиду уменьшения характерных размеров полупроводниковых приборов, возрастает влияние квантово-размерных эффектов на их характеристики, поэтому для повышения достоверности результатов моделирования их необходимо учитывать. Существующие на данный момент САПР транзисторных гетероструктур не позволяют в полной мере учесть квантовые явления, что, в конечном счете, влияет на качество прогноза характеристик структур и полевых транзисторов на их основе.

В данной работе представлены феноменологическая одномерная квантово-механическая математическая модель и методика прогнозирования характеристик транзисторных гетероструктур и полевых транзисторов на их основе, основанная на квантово-механической модели поперечного транспорта носителей заряда в структурах.

2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В математических моделях для описания поперечного транспорта электронов в гетероструктурах используется уравнение Пуассона:

$$\nabla(\varepsilon\nabla\varphi) = -(1/\varepsilon_0)\rho, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; φ – электростатический потенциал, В; ε_0 – электрическая постоянная, Ф·м⁻¹; $\rho = -q(n - N_d - p + N_a)$ – объемная плотность заряда, Кл·м⁻³; n, N_d, p, N_a – концентрации электронов, донорной примеси, дырок, акцепторной примеси соответственно, м⁻³.

Концентрации свободных носителей n и p в явном виде зависят от пространственных координат, а в неявном – от потенциала φ , вследствие чего необходимо прибегать к приближениям для их определения. В большинстве моделей влияние дырок p на потенциал структуры, ввиду их малого количества относительно n , не учитывают.

«Классическое» приближение [1] дает следующее выражение для определения концентрации свободных носителей заряда:

$$n = N_c \cdot F_{1/2} \left(-\frac{E_c - E_F - q\varphi}{kT} \right), \quad (2)$$

где N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, см⁻³; E_c – профили дна зоны проводимости, Дж; E_F – энергия уровня Ферми, Дж; $F_{1/2}$ – интеграл Ферми полуцелого порядка.

Самосогласованное решение уравнений (1), (2) удовлетворяет условию непрерывности функции распределения носителей заряда только в гомоструктурах, в то время как применение такого приближения в гетероструктурах дает нефизичный разрыв плотности состояний на границах раздела двух полупроводников.

Одним из подходов корректировки «классического» приближения является «подход градиента плотности», предложенный авторами [2, 3]. В рамках данного подхода, к уравнениям (1), (2) добавляется сглаживающая поправка на потенциал:

$$\begin{cases} \nabla(\varepsilon\nabla\varphi) = -\frac{q}{\varepsilon_0}(N_d - n - N_a), \\ n = N_c \cdot F_{1/2} \left(-\frac{E_c - E_F - q\varphi + \varphi_{DG}}{kT} \right), \\ \nabla(b_n \nabla \sqrt{n}) = \frac{\sqrt{n}}{2} \varphi_{DG}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\varphi_{DG}(x)$ – сглаживающая поправка на потенциал, $b_n = \hbar^2 / 4qm_n r_n$; r_n – параметр, зависящий от статистики носителей заряда, меняется в диапазоне от 3 (невырожденный случай) до 9 (электроны вырождены).

Данный подход устраняет разрыв концентраций на гетеропереходах, являющийся главным недостатком классического приближения, а также хорошо согласуется с более точной квантово-механической моделью. «Подход градиента плотности» довольно прост и не требователен к вычислительным мощностям. Однако его применение ограничивается небольшими областями счета (порядка 20 нм), а также модель слабочувствительна к большому количеству гетеропереходов. Также не всегда можно корректно выбрать параметр r_n , что вызовет дополнительную погрешность моделирования, а прямое вычисление параметра требует знания специальных функций. Несмотря на это, модель нашла свое применение в инженерных САПР, таких, как COMSOL [4].

Другой математической моделью, описывающей поперечный перенос в гетероструктурах, является квантово-механическая модель, основанная на самосогласованном решении системы уравнений Шредингера-Пуассона. Система уравнений квантово-механической модели имеет вид:

$$\begin{cases} \nabla(\epsilon \nabla \phi) = -\frac{q}{\epsilon_0} (N_d - n - N_a), \\ -\frac{\hbar^2}{2} \nabla \left(\frac{1}{m_e} \nabla \psi_i \right) + U \psi_i = E_i \psi_i, \\ n = \frac{mkT}{\pi \hbar^2} \sum_i \lg \left(1 + e^{\frac{E_f - E_c - E_i}{kT}} \right) \cdot |\psi_i|^2. \end{cases} \quad (4)$$

где ψ_i – i -я волновая функция; $U = -q\phi + E_c$ – профиль потенциальной энергии в структуре, Дж; E_i – энергия i -го уровня, Дж.

Данная модель дает полное понимание транспортных свойств электронов при моделировании гетероструктур, однако требует больше вычислительных мощностей ввиду решения задачи на собственные значения и вектора в стационарном уравнении Шредингера. Модель активно применяется уже более 30 лет различными коллективами авторов [5, 6].

Для прогнозирования характеристик полевых транзисторов необходимо учитывать продольный транспорт (т. е. направленный от истока к стоку прибора) электронов. Наиболее часто встречаемыми моделями в литературе и САПР продольного транспорта являются дрейфово-диффузионная, гидродинамическая, а также модель на основе метода Монте-Карло. Современные САПР, такие, как Silvaco TCAD и Synopsys TCAD, используют гидродинамическую модель описания транспорта электронов, которая, несмотря на высокую скорость расчета и возможность оценки всплеска дрейфовой скорости электронов, имеет существенный недостаток в определении количественного значения всплеска дрейфовой скорости, зависящего от времени релаксации по энергии τ_E , используемой в модели. Также τ_E зависит от размеров устройства, что приводит к ухудшению качества результатов моделирования при использовании фиксированного τ_E .

Непосредственное «скрещивание» моделей продольного и поперечного транспорта носителей заряда позволит проводить моделирование ППУ с высокой достоверностью. Однако такие модели сложны в реализации и требуют большого количества машинного времени для расчета. Поэтому в данной работе была разработана методика, позволяющая на основе решения одномерной системы уравнений (4) прогнозировать характеристики транзисторных гетероструктур и полевых транзисторов на их основе, как разработанных, так и проектируемых.

3. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

В одномерном случае система (4) записывается в следующей форме:

$$\begin{cases} -\frac{\hbar}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m(x)} \frac{\partial}{\partial x} \psi_i(x) \right) + U(x) \psi_i(x) = E_i \psi_i(x), \\ \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon(x) \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x) \right) = -q(N_d(x) - n(x)). \end{cases} \quad (5)$$

Решениями самосогласованной системы (5) при заданных граничных условиях являются концентрационный профиль $n(x)$, потенциал структуры $\varphi(x)$, а также волновые функции $\psi_i(x)$ и энергетические уровни E_i .

В предлагаемой методике основным параметром, определяющим свойства структуры и полевых транзисторов, является $n(x)$. С его помощью можно определить поверхностную плотность в канале структуры:

$$n_s = \int_{l_{\text{канал}}} n(x) dx, \quad (6)$$

где интеграл берется по всей толщине проводящего канала.

На основе значений n_s , полученных при различных граничных условиях, определяющих напряжение на затворе транзистора, вводится критерий для определения напряжения перекрытия V_n , при котором n_s должно уменьшиться в 100 раз по отношению к поверхностной плотности при открытом затворе.

По формуле, предложенной авторами [7], оценивается эффективная подвижность электронов в структуре:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\int \mu(x) n(x) dx}{\int n(x) dx}, \quad (7)$$

где $\mu(x)$ – подвижность электронов в гетероструктуре.

С помощью полученного μ_{eff} также можно определять V_n , при котором μ_{eff} становится равным подвижности электронов в буферном слое структуры.

Поверхностное сопротивление канала определяется выражением [8]:

$$R_{sh} = \frac{1}{qn_s \mu_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

которое масштабируется на зависимость сопротивления канала при различных расстояниях сток-исток.

Для определения тока насыщения используется соотношение:

$$I_{\text{нас}} = qn_s v_{\text{нас}}, \quad (9)$$

где $v_{\text{нас}}$ – скорость насыщения электронов в канале.

Точное определение $v_{\text{нас}}$ является довольно трудоемкой задачей, ввиду зависимости от длины затвора, особенностей конструкции устройства и качества изготовления гетероструктуры. Для феноменологических оценок можно использовать упрощенные формулы, например как в работе [9]:

$$v_{\text{нас}} \propto \left(\frac{e \frac{E_{op}}{kT} - 1}{e \frac{E_{op}}{kT} + 1} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где E_{op} – энергия оптического фонона.

Однако в представленной методике для сокращения количества входных параметров использовалось соотношение [10, 11]:

$$v_{\text{нас}} = \left(1,23 \cdot \frac{X_{\text{In}}}{0,53} + 0,8 \right) 10^7, \quad (11)$$

где X_{In} – мольная доля индия в канале.

Крутизна передаточной характеристики транзистора определялась по известному соотношению:

$$g_m = \frac{\Delta I_{\text{нас}}}{\Delta U_s} \Big|_{U_{\text{с.н}}} = \text{const.} \quad (12)$$

4. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДИКИ

Методика была апробирована на гетероструктуре $\text{Al}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}/\text{In}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{As}/\text{GaAs}$ и полевых транзисторах с длиной затвора 0,1 мкм и общей шириной затвора 140 мкм производства АО «НПП «Исток» им. Шокина». Параметры слоев структуры, используемые при моделировании, представлены в таблице.

Материал	Эффективная масса электронов m_e / m_0	Подвижность электронов μ , см ² /(В·с)
$\text{Al}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}$	0,081	3640
$\text{In}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{As}$	0,052	7200 [12]
GaAs	0,063	8000

Зонная диаграмма исследуемой структуры и концентрация носителей заряда при нулевом напряжении на затворе представлены на рис. 1.

На рис. 2 показана зависимость поверхностной концентрации электронов при различных напряжениях на затворе. Красная точка на зависимости соответствует напряжению перекрытия V_n , определенному по представленному в методике критерию.

На рис. 3 представлена зависимость эффективной подвижности электронов в структуре от напряжения на затворе, также красной точкой обозначено напряжение V_n .

Зависимость поверхностного сопротивления канала, рассчитанная по предложенной методике, представлена на рис. 4.

Зависимость сопротивления канала на миллиметр ширины затвора от расстояния сток-исток при нулевом смещении на затворе представлена на рис. 5.

Зависимость тока насыщения от напряжения на затворе и сравнение с экспериментальными данными для транзистора с заданной шириной затвора приведены на рис. 6.

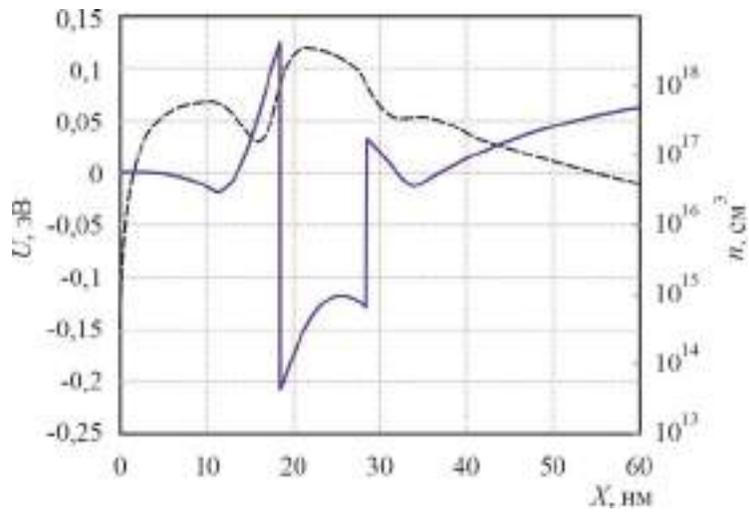


Рис. 1. Зонная диаграмма (сплошная линия) и концентрация свободных носителей (пунктирная линия) в гетероструктуре

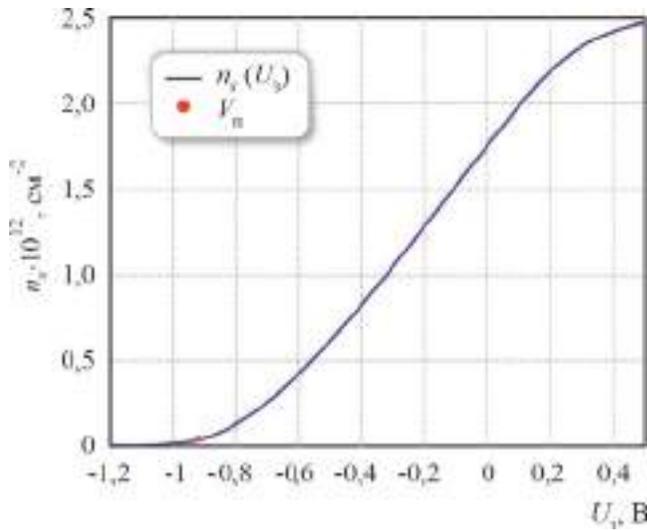


Рис. 2. Поверхностная концентрация носителей заряда в канале гетероструктуры

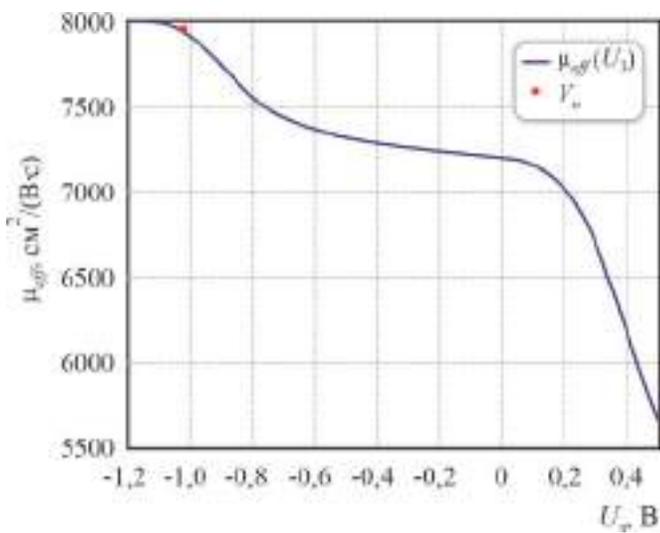


Рис. 3. Эффективная подвижность электронов в структуре

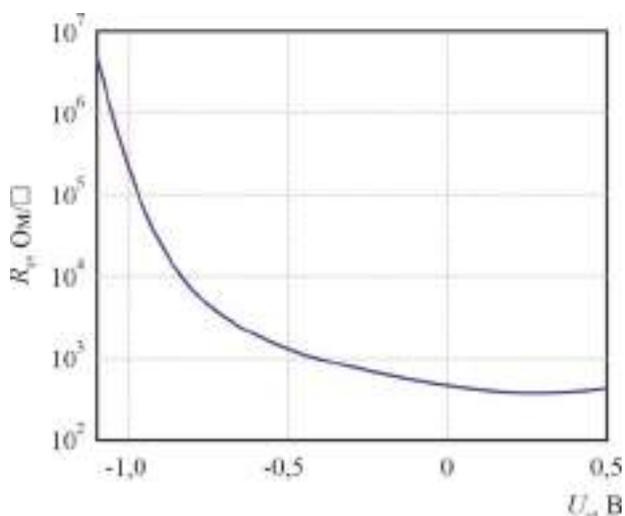


Рис. 4. Поверхностное сопротивление структуры D01 при различных напряжениях на затворе

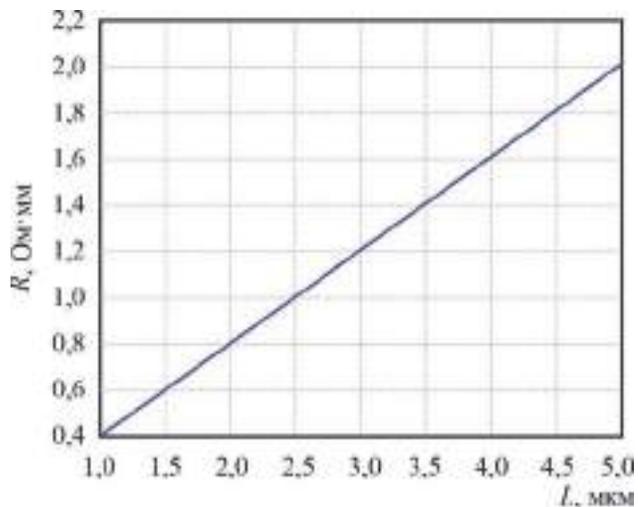


Рис. 5. Сопротивление канала на миллиметр ширины затвора при различных расстояниях сток-исток

Зависимость крутизны передаточной характеристики от напряжения на затворе и сравнение экспериментальных данных для транзистора с заданной шириной затвора представлены на рис. 7.

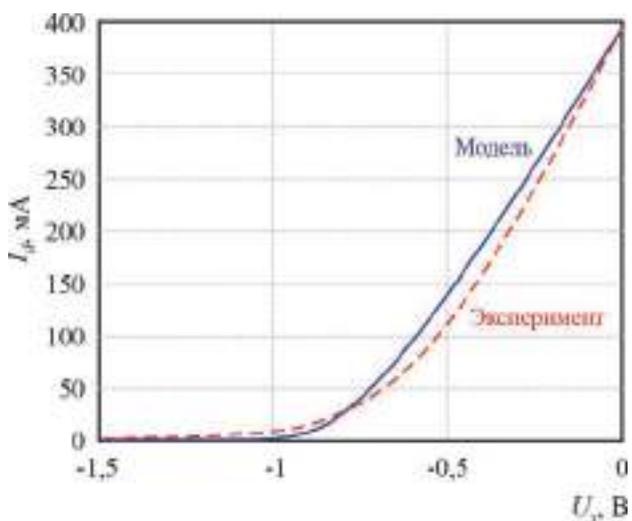


Рис. 6. Ток насыщения в полевом транзисторе (красная пунктирная линия) и теоретический расчет (синяя сплошная линия)

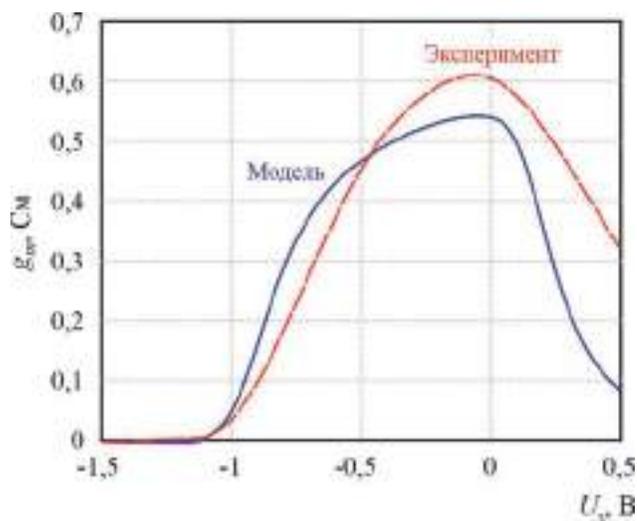


Рис. 7. Крутизна передаточной характеристики в полевом транзисторе (красная пунктирная линия) и теоретический расчет (синяя сплошная линия)

Полученные в результате моделирования значения напряжения перекрытия $V_n = 0,9$ В и тока насыщения $I_{нас} = 400$ мА хорошо согласуются с экспериментальными значениями 0,85 В и 396 мА соответственно.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена феноменологическая методика прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов на их основе. Результаты моделирования $\text{Al}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}/\text{In}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{As}/\text{GaAs}$ -гетероструктур и транзисторов показали хорошее согласование с экспериментальными данными, что позволяет использовать модель для прогнозирования характеристик как уже разработанных, так и проектируемых структур и транзисторов на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалимова, К. В. Физика полупроводников: учебное пособие для вузов / К. В. Шалимова – М.: Энергия, 1971. – 312 с.
2. Rahman, S. Optimization of graded AlInN/AlN/GaN HEMT device performance based on quaternary back barrier for high power application / S. Rahman // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – 2017. – Vol. 6, No 12. – P. 805 – 812.
3. Ancona, M. G. Density-gradient theory: a macroscopic approach to quantum confinement and tunneling in semiconductor devices / M. G. Ancona // Journal of Computational Electronics. – 2011. – Vol. 10. – P. 65 – 97.
4. COMSOL Blog. Intro to Density-Gradient Theory for Semiconductor Device Simulation. – URL: <https://www.comsol.com/blogs/intro-to-density-gradient-theory-for-semiconductor-device-simulation>.
5. A self-consistent solution of Schrodinger-Poisson equations using a nonuniform mesh / I-H. Tan, G. L. Snider, L. D. Chang, E. L. Hu // Journal of Applied Physics. – 1990. – Vol. 68, No 8. – P. 4071 – 4076.
6. Брунков, П. Н. Емкостная спектроскопия электронных состояний в гетероструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / П. Н. Брунков. – Санкт-Петербург, 2007. – 315 с.
7. Electron mobility in the GaAs/InGaAs/GaAs quantum wells / V. V. Vainberg, A. S. Pylypchuk, N. V. Baidus, B. N. Zvonkov // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2013. – Vol. 16, No 2. – P. 152 – 161.
8. Lenka, T. R. Characteristics study of 2DEG transport properties of AlGaIn/GaN and AlGaAs/GaAs-based HEMT / T. R. Lenka, A. K. Panda // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45, No 5. – P. 650 – 656.
9. High-frequency characteristics and saturation electron velocity of InAlAs/InGaAs metamorphic high electron mobility transistors at high temperatures / H. Ono, S. Taniguchi [et al.] // 2004 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. Conference Proceedings. 31, May – 4, June 2004, Kagoshima, Japan. – P. 288 – 291.
10. Analysis of transconductance characteristic of AlGaIn/GaN HEMTs with graded AlGaIn layer / S. Qu, X. Wang, H. Xiao [et al.] // Eur. Phys. J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 6. – P. 20101.
11. Gupta, R. A model for dual-channel high electron mobility transistors / R. Gupta, M. El. Nokali // Solid-State Electronics. – 1995. – Vol. 38, No 1. – P. 51 – 57.
12. Chatopadhyay, D. Electron transport in direct-gap III-V ternary alloys / D. Chatopadhyay, S. K. Sutradhar, B. R. Nag // J. Phys. C. – 1981. – Vol. 14. – P. 891 – 908.

Статья поступила 16 мая 2023 г.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 61

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА АНТИАГРЕГАНТНОГО ДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**А. В. Чеканов, В. А. Щелконогов, О. А. Баранова,
И. Г. Полников, К. Д. Казаринов**

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

Работа посвящена изучению механизмов биологической чувствительности организма человека к действию микроволнового излучения. Основное внимание уделяется участию клеточных мембран в процессах слияния клеток. На молекулярном уровне рассматривается влияние белков на процессы агрегации клеток крови. Показано, что решающим фактором биологического действия микроволнового излучения является слабый тепловой эффект.

КС: микроволновое излучение, межклеточные взаимодействия, агрегация клеток, слабые тепловые эффекты микроволнового излучения

STUDY OF THE MICROWAVE RADIATION ANTIAGGREGATION ACTION MECHANISM

**A. V. Chekanov, V. A. Shchelkonogov, O. A. Baranova,
I. G. Polnikov, K. D. Kazarinov**

FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino

The work is devoted to the study of the mechanisms of human body biological sensitivity to the microwave radiation action. The main attention is paid to participation of cell membranes in the processes of cell fusion. The influence of proteins on the processes of blood cells aggregation is considered at the molecular level. It has been shown that the decisive factor in the biological effect of microwave radiation is a weak thermal effect.

Keywords: microwave radiation, intercellular interactions, aggregation of cells, weak thermal effects of microwave radiation

1. ВВЕДЕНИЕ

Ситуация в мире, связанная с интенсивным продвижением новой системы беспроводной связи 5G и ожиданием неизбежно следующей за ней системы 6G, предполагает беспрецедентно высокий уровень плотности микроволнового излучения в среде обитания человека. Опубликованные результаты исследований пока не предоставляют достаточной информации для оценки опасности воздействия или же интерпретации вопроса о биологических эффектах. Два основных набора допустимых пределов воздействия радиочастотного (RF) излучения, установленных Международной комиссией по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP 2020) и Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE C95.1-2019), недавно были пересмотрены и

обновлены со значительными изменениями в пределах диапазона частот 30...300 ГГц [1]. В этом документе сравниваются данные о тепловых повреждениях и боли от воздействия микроволновой энергии с соответствующими данными от инфракрасной энергии и других источников тепла и оцениваются коэффициенты безопасности, которые включены в пределы радиочастотного воздействия IEEE и ICNIRP. Критерии повреждения те же, что используются в ИК-ограничениях ICNIRP: минимальное повреждение эпителия роговицы и ожог первой степени (эритема на коже, наблюдаемая в течение 48 ч после воздействия). Данные свидетельствуют о том, что ограничением термической опасности для кожи является кожная боль при продолжительности воздействия менее 20 мин и термическое повреждение при более длительном воздействии. Однако данные о радиочастотном, ИК термическом повреждении и болевых порогах показывают, что для получения термически опасных эффектов потребуется воздействие, намного превышающее текущие пределы ICNIRP и IEEE. Цитируемый документ посвящен исключительно термическим опасностям от микроволнового воздействия для кожи и роговицы, которые являются наиболее подверженными воздействию в рассматриваемом диапазоне частот.

В работе [2] представлены результаты подробных исследований воздействия микроволнового излучения на сетчатку глаза кролика. Были выявлены помутнения роговицы, повреждения эпителия и воспаления глаз, которые наблюдались до 2-3-х суток после облучения интенсивностью не более 200 мВт/см². После микроволнового воздействия при интенсивности 100 и 75 мВт/см² не наблюдалось заметных глазных изменений, кроме обратимых изменений роговицы и обратимого повреждения эпителия. К этому следует добавить, что никаких глазных изменений не наблюдалось после экспозиции при 50 или 10 мВт/см². Время облучения во всех представленных в работе экспериментах не превышало 6 мин.

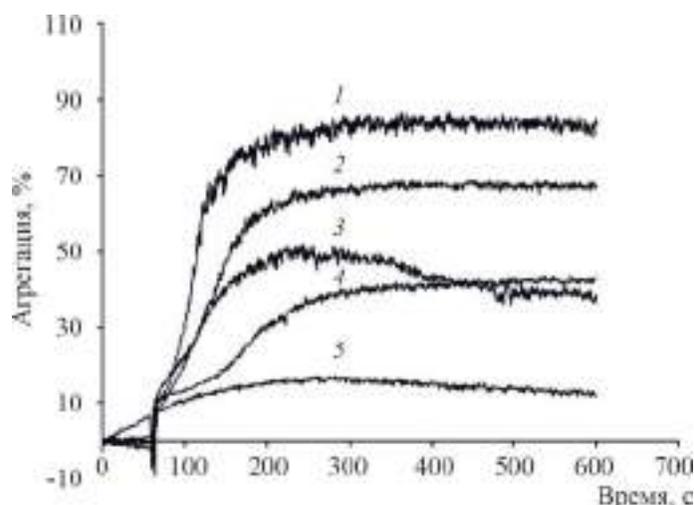
На данный момент накоплено недостаточно научных данных для оценки воздействия на здоровье микроволнового излучения, которое планируется использовать в разрабатываемых устройствах 5G. Тем не менее, в связи с тем что имеются данные, свидетельствующие о наличии биофизических механизмов воздействия микроволнового излучения на организм человека, которые могут привести к неблагоприятным последствиям для здоровья, возможно использование принципа предосторожности или принципа «Алара» (минимального риска) при формировании экологических требований к строительству и эксплуатации инфраструктуры планируемых систем 5G, 6G [3].

Таким образом, экспериментальные исследования преследуют цель определить механизмы, провоцирующие появление медицинской патологии биологических объектов под действием микроволнового излучения. Наличие физически обоснованных механизмов биологической чувствительности организма человека к действию микроволнового излучения, как было уже сказано, предъявляет соответствующие требования к формированию экологических норм к строительству и эксплуатации планируемых систем беспроводной связи. Следуя в русле этой идеологии, мы продолжаем изучение механизмов биологических эффектов микроволнового излучения в диапазоне КВЧ.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В предшествующей нашей работе были представлены результаты экспериментальных исследований по изучению антиагрегантного действия микроволнового излучения на клетки крови [4]. Было показано, 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 – ристомидина, а также в уменьшении угла наклона агрегатограммы (скорости агрегации тромбоцитов) (рисунок).



Типичная кривая агрегации тромбоцитов после КВЧ-облучения при добавлении индуктора агрегации, ристомидина, в среде, содержащей этанол в различной концентрации. Образец содержит 225 мкл плазмы донора и 25 мкл ристомидина с конечной концентрацией в образце 0,1 мг/мл:

1 – контроль (обогащенная тромбоцитами плазма (ОТП)); 2 – ОТП + облучение КВЧ; 3 – ОТП + облучение КВЧ/этанол 2,5 мкл; 4 – ОТП + облучение КВЧ/этанол 10 мкл; 5 – ОТП + облучение КВЧ/этанол 15 мкл

С целью определения агрегационной активности КВЧ-излучения была выполнена агрегометрия тромбоцитов с использованием прибора AggRam Helena (Великобритания) при температуре 37 °С. Проба представляла 225 мкл плазмы крови донора. Измерительная длина волны – 650 нм. Для перемешивания использовались магниты размером 3,5 × 4 мм с покрытием. 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. В качестве источника микроволнового излучения использовался генератор на основе диода Ганна с частотой в диапазоне от 32,9 до 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 7,2×3,4 мм² с согласующими элементами.

Как было сказано выше, КВЧ-излучение снижает степень агрегации тромбоцитов и изменяет угол наклона агрегатограммы по сравнению с контролем при добавлении индуктора – ристомидина. Аналогичный эффект наблюдался также и при агрегации тромбоцитов коллагеном. Однако наиболее выраженный эффект имел место при использовании ристомидина (ристоцетина), что является косвенным отражением влияния КВЧ-излучения на активность фактора фон Виллебранда, т. е. на высвобождение этого гликопротеина из α-гранул тромбоцитов. Механизм, посредством которого ристоцетин индуцирует агглютинацию тромбоцитов с участием фактора Виллебранда,

заключается во взаимодействии мультимерного гликопротеина фактора фон Виллебранда (VWF) с гликопротеином Ib рецептора тромбоцитов (GpIb). В данном взаимодействии особую роль играют фенольные группы ристоцетина, влияние которых может приводить к потере как агглютинирующей, так и тромбоцитарной активности тромбоцитов. Восстановление фенольных групп с помощью гидроксилamina способно восстановить обе активности. Добавленный положительно заряженный ристоцетин связывается через свои фенольные группы с участками на поверхности тромбоцитов и уменьшает отрицательный заряд тромбоцитов. Это может снизить электростатическое отталкивание между тромбоцитами и/или между тромбоцитами и отрицательно заряженным фактором фон Виллебранда и позволить макромолекулярному фактору фон Виллебранда вызвать агглютинацию, образуя мост между тромбоцитами. Как известно, фактор фон Виллебранда не только включает внешний и внутренний механизмы коагуляции, но и активирует противосвертывающую систему, предупреждая таким образом избыточное тромбообразование. Микроволновое облучение, стимулируя увеличение скорости образования свободных радикалов в обогащенной тромбоцитами плазме, может регулировать агрегационную активность тромбоцитов путем воздействия на структурные и функциональные свойства ферментов [5–7]. Как показывает анализ литературы, имеются экспериментальные данные по изучению электромагнитных воздействий с целью коррекции нарушений реологических свойств крови. В работе [8] было установлено, что КВЧ-облучение в определенных условиях вызывает заметное ингибирование функциональной активности тромбоцитов в нативной плазме по сравнению с контролем.

Добавление этанола вызывало незначительное повышение степени агрегации тромбоцитов в наших экспериментах [9], что, возможно, обусловлено образованием гидроксиэтильных радикалов, которые являются дополнительными модуляторами тромбоцитарной активности [10, 11].

На основании известных литературных данных можно предположить, что активированные тромбоциты образуют две субпопуляции, одна из которых способна эффективно агрегировать, а другая осуществляет экстернализацию фосфатидилсерина на внешней стороне мембраны и таким образом ускоряет ход мембранно-зависимых реакций свертывания крови. При этом происходит активация тромбоцитов и увеличение концентрации кальция в его цитоплазме. В дальнейшем происходит аккумуляция кальция в митохондриях до «критического уровня», что является пусковым моментом апоптоза в тромбоцитах. Запускается процесс «митохондриального некроза» клеток, который сопровождается активным выходом кальция и свободных радикалов из митохондрий, а также деградацией и разрушением цитоскелета, что приводит к значительному увеличению размера тромбоцитов [12]. В работе [13] было показано, что в активированных тромбоцитах повышается синтез активных форм кислорода.

Добавление этанола в среду клеток индуцирует митохондриально-опосредованный внутренний апоптоз тромбоцитов и тем самым приводит к снижению количества циркулирующих тромбоцитов. Он вызывает деполяризацию митохондриального внутреннего трансмембранного потенциала, активацию Вах, подавление Bcl-2 и активацию каспазы-3, блокирует поверхностную экспрессию связывания Р-селектина или PAC-1 [14].

В покоящихся (интактных) тромбоцитах мембранные фосфолипиды распределены асимметрично: фосфатидилхолин и сфингомиелин в основном локализуются на внешней поверхности плазматической мембраны, тогда как фосфатидилэтаноламин (ФЭ) и фосфатидилсерин (ФС) – на внутренней поверхности. Эта асимметрия поддерживается действием двух мембранных

липидных транспортеров: флиппазы и флоппазы [15]. После активации тромбоцитов сильными агонистами эта асимметрия теряется из-за активации Ca^{2+} -зависимых фосфолипидных скремблаз, которые двунаправленно переносят фосфолипиды [16]. Таким образом, активность скремблазы приводит к экспрессии отрицательно заряженных фосфолипидов, особенно ФС, на внешней стороне мембраны тромбоцитов, обеспечивая тем самым необходимую поверхность для сборки компонентов коагуляции, которые требуются для генерации тромбина. Эта последовательность реакций приводит к гибели значительного количества тромбоцитов, участвующих в агрегации, и, следовательно, к снижению регистрируемого уровня агрегации и скорости ее нарастания в процессе эксперимента. Поскольку агрегация тромбоцитов в присутствии ристомицина происходит в результате взаимодействия комплекса $Ib\alpha$ -V-IX тромбоцитарного гликопротеина (GP), находящегося на поверхности мембраны, и фактора фон Виллебранда (VWF), можно предположить, что этанол, добавленный в среду инкубации клеток, влияет на структурные свойства клеточной мембраны. Чтобы понять, что происходит с клеточными мембранами при добавлении первичных спиртов, следует обратиться к результатам исследования [17]. В этой работе оценивались изменения текучести, деформируемости и стабильности мембраны эритроцитов в присутствии четырех членов гомологичной серии первичных спиртов (то есть метанола, этанола, 1-пропанола, 1-бутанола), концентрации которых не превышали 0,5 %. Используя методы эктацитометрии и спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), было показано, что спирты оказывали двухфазное влияние на деформацию мембран, вызывая ее увеличение, а затем снижение деформации в зависимости от концентрации добавляемых первичных спиртов и размера их молекул.

Как известно, алкоголь вызывает апоптоз в гепатоцитах, в культурах нервных клеток, фибробластов роговицы, а также способствует активации апоптоза у тромбоцитов [18]. Также отмечено, что потребление крысами этанола в течение 21 дня приводило к снижению агрегации тромбоцитов [19]. Следует отметить результаты наших экспериментальных исследований, представленные в работе [20], которые показывают, что после пробоя клеток крови короткими высоковольтными импульсами агрегация не наблюдалась. При этом последующее КВЧ-облучение, как и инкубация клеток при температуре, близкой к физиологической, частично восстанавливало способность клеток к агрегации. КВЧ-облученные клетки увеличивали электрическую прочность и, по сравнению с контрольными, обнаруживали меньшую скорость ионных утечек и соответственно выше скорость агрегации. В нашем эксперименте проявлялся двухфазный характер влияния метанола и этанола на агрегацию тромбоцитов. Как метанол, так и этанол вызывали при определенных начальных концентрациях снижение процента агрегации и угла наклона кривой, а затем увеличение этих параметров с ростом концентрации добавляемых спиртов в пробе. Следуя приведенным выше литературным данным, можно предположить, что первичные спирты вызывали увеличение, а затем снижение текучести липидного компонента мембраны тромбоцитов в зависимости от концентрации добавляемого спирта. Это влияло на стабильность белково-липидного бислоя мембран тромбоцитов и приводило к нарушению перераспределения и движения ионов через мембрану, а также гидролиза инозитольных фосфолипидов, что способствовало увеличению ионной силы и, в итоге, защелачиванию среды, в результате чего могло происходить нарушение целостности взаимодействия комплекса $Ib\alpha$ -V-IX тромбоцитарного гликопротеина (GP) и фактора фон Виллебранда (VWF).

Исследования модельных бислоевых мембран показывают, что используемые спирты здесь вызывают постепенное расширение мембраны и снижение толщины с увеличением concentra-

ции и что эффекты коррелируют с длиной цепи [21]. Спирты взаимодействуют с липидными бислоями так, что группа ОН располагается в области межфазной границы бислоя мембраны клетки. При этом следует учитывать, что характеристики спиртов, включая размер липофильной части и коэффициент распределения в бислое мембраны, увеличиваются с увеличением длины углеводородной цепи; молекулы спиртов проникают все глубже в слои мембраны с увеличением концентрации и могут проникать в гидрофобную часть мембранного бислоя [22, 23]. Исследованию механизмов существования двух субпопуляций активированных тромбоцитов с различными свойствами посвящена работа [24], в которой предложен механизм агрегации, с помощью которого прокоагулянтные тромбоциты включаются в агрегаты и тромбы. Была предложена теория формирования гетерогенности в ответе тромбоцитов, подтвержденная экспериментально. Исследователи установили механизм модуляции этого процесса через пуринорецепторы, выявили механизмы инактивации адгезионных рецепторов в субпопуляции сверхактивированных тромбоцитов, а также физиологический смысл двухрецепторной схемы активации тромбоцитов тромбином. В рамках этого направления была обнаружена активация контактного пути свертывания на прокоагулянтной субпопуляции тромбоцитов, неравномерность прокоагулянтной активности по поверхности этих клеток, разработана математическая модель их участия в свертывании крови [25].

Обсуждая механизм наблюдаемого эффекта действия КВЧ-излучения на процесс агрегации тромбоцитов, индуцированный ристомидином, мы принимали во внимание наличие двух структурных переходов 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.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-01110-23-01 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН на 2023 год.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие микроволнового излучения на все тело приводит к нагреву кожи, повреждению эпителия роговицы глаза, подкожного жирового слоя, а также капилляров и мелких кровеносных сосудов в дерме и жировом слое. Из-за сложности биохимических реакций и взаимодействий в живых тканях и в биологических жидкостях нельзя однозначно предсказать реакцию клеток или биологических систем на нагревание, вызванное КВЧ-излучением. Исследования процесса агрегации тромбоцитов в присутствии первичных спиртов в условиях микроволнового облучения низкой интенсивности существенно расширяют наши прежние представления о действии микроволнового излучения на клетки крови. Добавление в среду клеток этанола влияет на стабильность белково-липидного слоя мембран клеток, а КВЧ-излучение за счет слабого нагрева способно компенсировать это влияние. Действие КВЧ-излучения на активность фактора фон Виллебранда при определенных условиях может активировать противосвертывающие системы, предотвращая избыточное тромбообразование. Результаты работы могут быть полезны для применения КВЧ-излучения как безопасного фактора воздействия с целью коррекции патологий реологических свойств крови человека и, в частности, при алкогольной интоксикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Foster, K. R.** Time-temperature thresholds and safety factors for thermal hazards from radiofrequency energy above 6 GHz / K. R. Foster, M. C. Ziskin, Q. Balzano // *Health Phys.* – 2021, Sep. – Vol. 121 (3). – P. 234 – 247.
2. Acute ocular injuries caused by 60-GHz millimeter-wave exposure / M. Kojima, M. Hanazawa, Y. Yamashiro [et al.] // *Health Physics.* – 2009, Sep. – Vol. 97 (3). – P. 212 – 218. – DOI: 10.1097/HP.0b013e3181abaa57.
3. Protection of the population health from electromagnetic hazards – challenges resulting from the implementation of the 5G network planned in Poland / M. Zmyslony, P. Bieńkowski, A. Bortkiewicz [et al.] // *Medycyna Pracy.* – 2019. – Vol. 71 (1). – DOI: 10.13075/mp.5893.00867.
4. Антиагрегантная эффективность микроволнового излучения / А. В. Чеканов, В. А. Щелконогов, О. А. Баранова [и др.] // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 2022. – Вып. 2 (553). – С. 90 – 95.
5. **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.
6. Effect of a 2.45-GHz radiofrequency electromagnetic field on neutrophil chemotaxis and phagocytosis in differentiated human HL-60 cells / S. Koyama, E. Narita, Y. Suzuki [et al.] // *Journal of Radiation Research.* – 2015. – Vol. 56. – P. 30 – 36.
7. **Шаталина, Л. В.** Перекисное окисление липидов как механизм регуляции агрегационной активности тромбоцитов / Л. В. Шаталина // *Кардиология.* – 1993. – Т. 10, № 33.1 – С. 25 – 28.
8. Information EHF-interactions in a system of live objects (human platelets) / V. F. Kirichuk, M. V. Volin, A. V. Mажborodin [et al.] // *Tsitologiya.* – 2001. – Vol. 43 (12). – P. 1115 – 1122.
9. Микроволновое излучение снижает активность межклеточного взаимодействия элементов крови в присутствии этанола / К. Д. Казаринов, В. А. Щелконогов, О. А. Баранова [и др.] // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 2019. – Вып. 4. – С. 78 – 83.
10. Свободно-радикальное окисление в интактных и активированных тромбоцитах / Е. Н. Ермолаева, Л. В. Кривожижина, С. А. Кантюков, Е. Ф. Сурина-Марышева // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – № 7-1. – С. 61 – 65.
11. Antioxidants change platelet responses to various stimulating events / A. Sobotková, L. Mášová-Chrastinová, J. Suttner [et al.] // *Free Radic. Biol. Med.* – 2009. – Vol. 47 (12). – P. 1707 – 1714.
12. **Hartwig, J. H.** The platelet: form and function / J. H. Hartwig // *Seminars in hematology.* – 2006. – Vol. 43 (1 Suppl. 1). – S. 94 – 100. – DOI:10.1053/j.seminhematol.
13. Dynamics of calcium spiking, mitochondrial collapse and phosphatidylserine exposure in platelet subpopulations during activation / S. I. Obydennyu, A. N. Sveshnikova, F. I. Ataullakhanov, P. Mikhail // *Journal of Thrombosis and Haemostasis.* – 2016. – Vol. 14, No 9. – P. 1867 – 1881.
14. Ethanol induces platelet apoptosis / Lei Liu, Mengxing Chen, Lili Zhao [et al.] // *Alcoholism, Clinical and Experimental Research.* – 2017. – Vol. 42, No 2. – P. 291 – 298.
15. **Daleke, D. L.** Regulation of transbilayer plasma membrane phospholipid asymmetry / D. L. Daleke // *J. Lipid Res.* – 2003. – Vol. 44 (2). – P. 233 – 242.
16. **Bevers, E. M.** Phospholipid scramblase: an update / E. M. Bevers, P. L. Williamson // *FEBS Lett.* – 2010. – Vol. 584 (13). – P. 2724 – 2730.
17. / M. Sonmez, H. Y. Ince, O. Yalcin [et al.] // *PLoS One.* 8(9), e76579 (2013). – DOI: 10.1371/journal.pone.0076579.
18. / L. Liu, M. Chen, L. Zhao [et al.] // *Alcohol Clin. Exp. Res.* – 2017. – Vol. 41 (2). – P. 291 – 298.
19. / O. Baysan, K. Kaptan, K. Erinf [et al.] // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine.* – 2005. – Vol. 2. – P. 85 – 90.
20. **Казаринов К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн // *Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника.* – 2018. – Вып. 2. – С. 62 – 75.

21. **Ly, H. V.** The influence of short-chain alcohols on interfacial tension, mechanical properties, area/molecule and permeability of lipid bilayers / H. V. Ly, M. L. Longo // *Biophys. J.* – 2004. – Vol. 87. – P. 1013 – 1033. – DOI:10.1529/biophysj.103.034280.
22. **Dickey, A. N.** How alcohol chain-length and concentration modulate hydrogen bond formation in a lipid bilayer / A. N. Dickey, R. Faller // *Biophys. J.* – 2007. – Vol. 92. – P. 2366 – 2376. – DOI:10.1529/biophysj.106.097022. PubMed: 17218462.
23. **Gurtovenko, A. A.** Interaction of ethanol with biological membranes: The formation of non-bilayer structures within the membrane interior and their significance / A. A. Gurtovenko, J. Anwar // *J. Phys. Chem. B.* – 2009. – Vol. 113. – P. 1983 – 1992. – DOI:10.1021/jp808041z. PubMed: 19199697.
24. **Sveshnikova, A. N.** Compartmentalized calcium signaling triggers subpopulation formation upon platelet activation through PAR1 / A. N. Sveshnikova, F. I. Ataulakhanov, M. A. Pantelev // *Mol. Biosyst.* – 2015. – Vol. 11, No 4. – P. 1052 – 1060.
25. **Shibeko, A. M.** Untangling the complexity of blood coagulation network: use of computational modelling in pharmacology and diagnostics / A. M. Shibeko, M. A. Pantelev // *Brief. Bioinform.* – 2016. – Vol. 17, No 3. – P. 429 – 439.

Статья поступила 12 мая 2023 г.

НОВЫЕ КНИГИ

САХНИН А. А. Комплексная оценка радиоэлектронной защищенности военных систем связи. Монография. – М.: Радиотехника, 2022. – 312 с.

Проводится анализ элементов, параметров и характеристик военных систем связи, работающих в условиях информационного противоборства. Дается классификация и характеристики преднамеренных помех. Рассмотрены концептуальные аспекты моделирования военных систем связи. Разработан и представлен методический аппарат оценки их развед- и помехозащищенности, представлен комплекс методик и алгоритмов их инженерных расчетов.

Книга предназначена научным работникам и инженерам, работающим в области электросвязи и радиоэлектронной борьбы. Может быть полезна аспирантам и студентам вузов.

ЭКОНОМИКА

УДК 658.5

АЛГОРИТМ УЧЕТА ДВИЖЕНИЯ И ВОСПОЛНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

Д. Г. Шутов, В. Р. Александров

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

Реализация предложенного алгоритма в программных продуктах «Цифрового двойника» предприятия РЭК будет способствовать автоматизации движения и восполнения материалов на предприятии с учетом множества факторов, в том числе «незавершенного производства» и «срочного» заказа. Статья предназначена для специалистов подразделений АСУ предприятий РЭК и может представлять интерес для сотрудников производственно-технологических, планово-экономических, снабженческих и иных служб предприятий.

КС: матрица материалов, вектор-столбец продукции, материал-аналог, цифровое производство

ALGORITHM FOR ACCOUNTING THE MOVEMENT AND REPLENISHMENT OF MATERIALS AT THE ENTERPRISE OF RADIOELECTRONIC INDUSTRY

D. G. Shutov, V. R. Alexandrov

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

The implementation of the proposed algorithm in software products of the REI enterprise «Digital twin» will contribute to automation of the movement and replenishment of materials at the enterprise taking into account many factors including «work in progress» and «urgent» order.

Keywords: material matrix, product column-vector, material-analog, digital production

1. ВВЕДЕНИЕ

В основу алгоритма учета движения и восполнения материалов на предприятии положен математический формализм теории матриц [1–3]. Матрица в виде двумерного математического объекта оказалась чрезвычайно удобной формой для описания любых объемов товарно-материальных ценностей. Другое преимущество матричного формализма состоит в том, что он позволяет оперировать (в едином математическом действии) с двумерными объектами – матрицами, инвариантными относительно единиц измерения элементов, наполняющих эти матрицы. Иными словами, предлагаемая матрица материалов (или иных покупных комплектующих изделий, ПКИ) может одновременно содержать сведения о материалах, имеющих различные внешние предметные признаки, количественно определенные, например, в метрах, граммах, галлонах, литрах, квартях, рулонах и так далее. Предлагаемые алгоритмы упростят учет материалов и будут способствовать дальнейшей автоматизации процедур закупок ПКИ и планирования производства продукции.

2. ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАТРАТ МАТЕРИАЛОВ НА НОВЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПЕРИОД С УЧЕТОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНА ВЫПУСКА ПРОДУКЦИИ

Ключевым элементом математического алгоритма является матрица материала A_{ij} , в которую заложен следующий смысл. Элемент матрицы a_{ij} имеет значение количества материала i , которое идет на производство конечного изделия j , причем $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$, где m – количество материалов, перерабатываемых для выпуска продукции, а n – количество продуктов. Количество материала i можно измерять в единицах массы, например в граммах, или в единицах объема, например в кубических метрах, или в единицах площади – в квадратных или погонных метрах и так далее.

Следовательно, матрица материала A_{ij} инвариантна относительно единиц измерения материала и может одновременно содержать удельные количества материалов в разных системах измерения, что очень удобно для учета материалов. Такая инвариантная матрица материалов содержит информацию о материалах (группа А), которые физически входят в состав конечной продукции, и о технологических материалах (травители, транспортные газы, деионизованная вода и т. п. – группа Б), которые в состав конечного продукта не входят.

Например, масса материала i в изделии j равна 100 г, тогда элемент матрицы $a_{ij} = 100$ – в граммах, для остальных изделий материал i в матрице материалов нужно показывать в граммах. Для учета потерь материала группы А применяют коэффициент использования материала (КИМ). $\text{КИМ} = \text{масса детали} / \text{масса заготовки}$. Для нашего алгоритма удобно использовать величину обратную КИМ, то есть КИМ^{-1} . Предположим, для нашего примера $\text{КИМ}^{-1} = 1,2$, тогда практическая масса материала i , необходимая для изготовления одного изделия j , с учетом потерь равна 120 г, значит значение элемента $a_{ij} \times \text{КИМ}^{-1} = 120$. Обозначим величину $a_{ij} \times \text{КИМ}^{-1}$ через b_{ij} и перейдем к рассмотрению матрицы материалов B_{ij} , состоящей из элементов b_{ij} , содержащих сведения о материалах с учетом производственных потерь.

		Продукт				Материал		
		1	2	3	n			
$B_{ij} =$	(b_{11}	b_{12}	b_{13}	\dots	b_{1n}	1	(1)
		b_{21}	b_{22}	b_{23}	\dots	b_{2n}	2	
		\vdots			\ddots	\vdots		
)	b_{m1}	b_{m2}	b_{m3}	\dots	b_{mn}	m	

Пусть C_j – вектор-столбец выпускаемой продукции.

$$C_j = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

или после транспонирования имеем: $C_j = (C_1, C_2, \dots, C_n)^T$, где C_j – количество или производственный план выпуска продукции j , штук (или тыс. шт.).

Перемножим матрицу удельных значений материалов на вектор-столбец всей выпускаемой продукции:

$$\begin{aligned}
 B_{ij} \cdot C_j &= \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & & b_{2n} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & b_{m3} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} b_{11}C_1 + b_{12}C_2 + \dots + b_{1n}C_n \\ b_{21}C_1 + b_{22}C_2 + \dots + b_{2n}C_n \\ \vdots \\ b_{m1}C_1 + b_{m2}C_2 + \dots + b_{mn}C_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_m \end{pmatrix}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Из (3) следует, что $D_i = b_{ij}C_j$ – вектор-столбец, содержащий полную информацию о потребности всех материалов от $i = 1$ до $i = m$, которые необходимы для выполнения, например, квартального плана по выпуску всей продукции C_j , где j изменяется от $j = 1$ до $j = n$. Значения D_i целесообразно выводить отдельной таблицей.

Для локального, выборочного контроля можно определить:

а) $D_1 = b_{1j}C_j$ – количество материала $i = 1$, необходимое для выполнения квартального плана по выпуску всей продукции j в ассортименте n .

б) $D_1 = b_{13}C_3$ – количество материала $i = 1$, необходимое для квартального выпуска продукта C_3 . Используется для выборочного контроля.

в) $D_i = b_{i10}C_{10}$ – количество материалов $i = 1, 2, \dots, m$, необходимое для квартального выпуска продукта C_{10} . Используется в случае срочного заказа конкретной продукции.

3. ФАКТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ МАТЕРИАЛОВ НА КОНЕЦ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРИОДА С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНА ВЫПУСКА ПРОДУКЦИИ

На фактические затраты материалов влияют изменения квартального плана по выпуску продукции (уменьшение, увеличение). Выражение (3) справедливо также для приращений выпуска продукции, например:

3.1. $\Delta D_1 = b_{13}\Delta C_3$ – дополнительное количество материала $i = 1$, необходимое для наращивания квартального выпуска продукции C_3 на величину ΔC_3 , где $\Delta C_3 = C_{3\text{выпуск}} - C_{3\text{план}}$, при этом $\Delta C_3 > 0$;

3.2. $\Delta D_1 = b_{12}\Delta C_2$ – уменьшение количества материала $i = 1$, необходимого для выпуска продукции C_2 , при невыполнении плана выпуска продукции C_2 , где $\Delta C_2 = C_{2\text{выпуск}} - C_{2\text{план}}$, при этом $\Delta C_2 < 0$.

Следовательно, $\Delta D_i = b_{ij}\Delta C_j$ – вектор-столбец, содержащий полную информацию по дополнительному потреблению материалов (или их экономии).

Окончательная информация о расходе материалов при квартальном выпуске всей продукции ($j = 1, \dots, n$) определяется выражением:

$$D_i = b_{ij}(C_j \pm \Delta C_j), \quad (4)$$

где «+» выбирается при увеличении квартального выпуска продукции C_j , а «-» – при снижении квартального выпуска продукции C_j , где $1 \leq j \leq n$.

4. УЧЕТ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАТЕРИАЛОВ-АНАЛОГОВ

Пусть в матрице (1) материалы b_{ij} и $b_{i+1,j}$ – материалы-аналоги, взаимозаменяемые при производстве конкретной продукции C_j . При этом следует учитывать, что удельные количества материалов $b_{ij} \neq b_{i+1,j}$ и $\text{КИМ}_{ij} \neq \text{КИМ}_{i+1,j}$.

Предположим, что во II квартале при выпуске всей линейки продукции C_j использовался материал b_{ij} , а в III квартале при выпуске части продукции вместо него применялся материал-аналог $b_{i+1,j}$, который находится в другой строке матрицы (1). Следовательно, если в III квартале для выпуска продукции C_j с $j = 1, 2, 3, \dots, k$ начинает применяться материал-аналог $b_{i+1,j}$, то параметры матрицы (1): $b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, \dots, b_{ik}$ – необходимо обнулить; при этом в III квартале прежнего материала b_{ij} потребуется: $b_{i,k+1}C_{k+1} + b_{i,k+2}C_{k+2} + \dots + b_{i,n-1}C_{n-1} + b_{in}C_n$.

А для материала-аналога в III квартале удельные количества материала-аналога: $b_{i+1,k+1}, b_{i+1,k+2}, b_{i+1,k+3}, \dots, b_{i+1,n-1}, b_{i+1,n}$ – необходимо обнулить в матрице (1). Следовательно, материала-аналога в III квартале понадобится: $b_{i+1,1}C_1 + b_{i+1,2}C_2 + \dots + b_{i+1,k}C_k$.

Итак, материалы-аналоги несколько усложняют алгоритм, если их размещать в исходной матрице коэффициентов (1). В рассмотренном примере исходная матрица коэффициентов, содержащая кроме основного материала b_{ij} материал-аналог $b_{i+1,j}$, во II квартале в строке аналога содержит все нулевые коэффициенты, поскольку этот аналог не использовался.

Кроме того, в рассмотренных примерах при работе в III квартале с материалами-аналогами ряды продукции C_1, C_2, \dots, C_k , которые относятся к материалу $b_{i+1,j}$ и $C_{k+1}, C_{k+2}, \dots, C_n$, которые относятся к материалу b_{ij} , были выбраны упорядоченными для простоты рассмотрения проблемы учета материалов-аналогов. На практике к материалу b_{ij} в III квартале может относиться продукция, например, $C_1, C_3, C_{20}, C_{21}, C_n$, а остальная часть продукции: $C_2, C_4, \dots, C_{19}, C_{22}, \dots, C_{n-1}$ – будет относиться к материалу-аналогу $b_{i+1,j}$. Эту сложность нужно учитывать в «ручном» режиме или разработать для этого случая специальный алгоритм автоматизации производственного учета материалов-аналогов.

5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАКАЗА МАТЕРИАЛОВ

Выражением (4) определяются фактические затраты материалов на выпуск всей линейки продукции, например, на конец III квартала. Выражение (3) определяет плановые затраты материала при плановом выпуске продукции, например, в III квартале.

Введем обозначения: $D_i^{\text{склад}}$ – запасы материалов на центральном складе предприятия, например, на конец II квартала; $D_i^{\text{пр. запасы}}$ – производственные запасы материалов в цехах (незавершенное производство), например, на конец II квартала. Учитывая это, можно записать следующее уравнение для материалов:

$$D_i^{\text{склад, конец } z \text{ кв}} + D_i^{\text{пр. запасы, конец } z \text{ кв}} - D_i^{\text{план, } z+1 \text{ кв}} = Q_i^{z+1 \text{ кв}}, \quad (5)$$

где $1 \leq i \leq m$, $D_i^{\text{план, } z+1 \text{ кв}}$ – плановые затраты следующего за z квартала, которые определяются выражением (3), например, для III квартала (при $z = 2$). Таким образом, выражение $Q_i^{z+1 \text{ кв}}$ – плановое количество материала i на предприятии на конец III квартала, вычисленное в конце II квартала (дается в табличной форме).

Из выражения (5) можно вычислить коэффициент запаса материала i на следующий, например на IV, квартал:

$$K_i^{\text{коэф. запас, IV кв}} = Q_i^{\text{конец III кв}} / D_i^{\text{план, IV кв}}. \quad (6)$$

Коэффициент запаса должен иметь безрисковые значения для конкретного материала i . При этом нужно учитывать гарантийный срок хранения (годности) материала i , время для проведения конкурса на закупку, время на поставку материала со склада поставщика на склад предприятия. Пусть срок годности материала i равен 9 месяцев, время проведения конкурса – 1 месяц, время изготовления материала предприятием-поставщиком ~ 1 месяц, время поставки ~ 2 месяца, тогда на момент прихода на склад предприятия фактический срок годности будет: $9 - 2 - 1 \approx 6$ (месяцев). В этом случае для материала i значение коэффициента запаса на IV квартал, определенное в конце II квартала, должно быть: $K_i^{*запас} \geq 2$. При критических значениях $K_i^{*запас} \cong 1 \div 2$ автоматически подается заявка на материал i в отдел закупок и проводится закупка материала i , с учетом возможного планового поступления материала i в III квартале, для выбранного примера.

Критические значения $K_i^{*запас}$ различных материалов определяются отдельно.

6. ПРОБЛЕМА «СРОЧНОГО» ЗАКАЗА

Предположим, что заказчик потребовал от предприятия осуществить выпуск продукта C_{10} в количестве N штук в кратчайший срок. Пусть событие произошло в III квартале. Из (5) находим значения остатков материалов на конец III квартала без учета «срочного» заказа:

$$D_i^{\text{склад, конец II кв}} + D_i^{\text{пр. запасы, конец II кв}} - D_i^{\text{план III кв}} = Q_i^{\text{конец III кв}}.$$

Для решения задачи из выражения (3) собираем 10-столбец с материалами:

$$D_i^{\text{план ср. зак}} = \begin{pmatrix} b_{1,10}N \\ b_{2,10}N \\ \vdots \\ b_{m,10}N \end{pmatrix}.$$

С учетом «срочного» заказа выражение для коэффициента запаса K^* имеет вид:

$$K_i^{*запас} = Q_i^{\text{конец III кв}} / (D_i^{\text{план IV кв}} + D_i^{\text{план ср. зак}}).$$

При $K_i^{*запас} \cong 2 \div 3$ и выше – «срочный» заказ выполним.

При $K_i^{*запас} \cong 0 \div 1$ – «срочный» заказ невыполним без ущерба для исполнения других договоров.

При $K_i^{*запас} \cong 1 \div 2$ – для принятия решения по «срочному» заказу нужно просчитывать дополнительные риски.

Необходимо учесть, что критические значения $K_i^{*запас}$ определяются (задаются) для каждого материала отдельно.

Конечно, расчет для «срочного» заказа касается только материалов.

7. ВЫВОДЫ

Для реализации предложенного алгоритма изучены автоматизированные модели организации производства на крупнейшем предприятии дивизиона ЭКБ и СВЧ – АО «НПП «Исток» им. Шокина». На предприятии разработан и лицензирован программный продукт «цифровое производство» [4], который является «цифровой оболочкой» или «цифровым двойником» предприятия. В «цифровом двойнике» производства учитываются факторы, влияющие на работу производ-

ственных линий, а также отдельного технологического и инженерного оборудования, включая количественные и качественные характеристики оборудования, сырья, технологии, условия эксплуатации. Алгоритм учета движения и восполнения материалов будет являться одним из алгоритмов цифрового двойника производства, который позволит упростить управленческий учет на предприятии, повысить надежность реализации техпроцесса и будет способствовать экономии средств, направляемых на закупку материалов.

Авторы выражают благодарность С. В. Щербакову за ценные замечания при подготовке рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланкастер, П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М.: «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1982.
2. Беклемишев, Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры / Д. В. Беклемишев. – СПб.: Издательство «Лань», 2015.
3. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М.: «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1966.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669482.

Статья поступила 27 апреля 2023 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Угломерные двухпозиционные пассивные системы радиомониторинга воздушного базирования. Методы и алгоритмы оценивания и управления
/ Под ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2022. – 232 с.

Рассмотрены теоретические основы синтеза и анализа угломерных двухпозиционных пассивных систем воздушного базирования. Приведены методы ортогонального и градиентного управления позициями, алгоритмы оценивания местоположения источников радиоизлучения на основе линейных и нелинейных методов фильтрации и алгоритмы отождествления пеленгов. В приложении рассмотрены методы и алгоритмы углового оценивания со сверхразрешением.

Представленный материал основан на последних достижениях науки и техники.

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

ИСТОРИЯ

УДК 9

МЫ «ИСТОКОВЦЫ»

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, Т. А. Балыко

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

WE COME FROM «ISTOK»

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, T. A. Balyko

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

Нынешний год юбилейный для АО «НПП «Исток» им. Шокина». Исполнилось 80 лет со дня принятия постановления ГКО СССР «О радиолокации», подписанного 4 июля 1943 г. И. В. Сталиным. Это дата рождения не только нашего предприятия, но и всей радиоэлектронной промышленности страны.

Для сотрудников «Истока» навсегда останутся в памяти основоположники НИИ-160: адмирал-инженер Аксель Иванович Берг; министр электронной промышленности СССР Александр Иванович Шокин; директора предприятия академик Сергей Аркадьевич Векшинский, Владимир Иванович Егиазаров, Андрей Андреевич Захаров, Валентин Александрович Гольцов, Мстислав Михайлович Федоров, Сергей Иванович Ребров, Александр Николаевич Королев; основатель научной школы академик Николай Дмитриевич Девятков; руководители научно-технических направлений: доктора наук С. А. Зусмановский, В. А. Афанасьев, А. П. Федосеев, Б. М. Царев, В. С. Лукошков, М. Б. Голант, А. С. Тагер, Ю. Д. Самородов, И. Е. Роговин, Э. А. Гельвич, Б. Ч. Дюбуа, Д. М. Петров, С. С. Зырин, Г. А. Крысов, В. П. Сазонов, Н. Д. Урсуляк, В. А. Солнцев, Р. А. Силин, А. Б. Киселев, А. С. Победоносцев, А. Г. Жуков, В. А. Масычев, А. А. Гладун, В. Д. Лейман, Р. И. Равич, кандидаты наук В. Ф. Коваленко, А. В. Красилов, В. И. Бацев, В. Г. Кармазин, С. В. Королев, И. И. Бродуленко, К. Г. Ноздрин, А. А. Шенюгин, Ю. П. Мякинков, В. Я. Эфрос, В. И. Гуртовой, В. Н. Русаков, Ю. А. Вецгайлис, Л. Г. Некрасов, В. П. Беляев, Я. А. Юхвидин, И. И. Самарцев, А. А. Негирев, А. М. Алексеенко, М. Ф. Воскобойник, Ю. В. Феофанов; Ю. В. Печенин, Б. И. Ставицкий, М. И. Лопин, М. У. Муртазин, К. И. Алмазов-Долженко, Н. В. Рабодзей, А. М. Храпко, М. А. Иванов; главные конструкторы и разработчики Л. А. Парышкуро, В. И. Мнойн, О. Н. Аристархова, Г. А. Метлин, С. П. Кантюк, Г. М. Кауфман, Ф. М. Шапиро, Л. М. Решетина, В. И. Чибисов, Н. А. Лебедев; руководители производства И. И. Каминский, Д. А. Клепиков, В. П. Смирязев, М. Х. Сергеев, В. П. Шевченко, А. И. Овчинников, А. А. Маклаков, И. М. Панас, Е. Н. Покровский, К. И. Бухарин, М. С. Акулин, А. Я. Астафьев, Г. Ф. Панкин; технологи А. Г. Мишкин, Н. В. Черепнин, Г. А. Метлин, Б. П. Никонов, Е. А. Котюргин, С. И. Гапонов, В. В. Окшин, А. Н. Ковтунов, В. И. Куликов, И. П. Стародубов; руководители служб К. А. Амосов, И. И. Девяткин, А. А. Сорокин, Ю. П. Уточкин, И. Т. Якименко, В. Е. Коренской, В. М. Гулейков, А. Ю. Слободенюк, Б. М. Гильман, А. Х. Мац, В. А. Бродский, В. Я. Митрофанов, П. В. Красногирь, Г. Г. Авдиенко,

А. В. Трофимов, А. Д. Мельников, Б. Я. Кистин, Л. А. Ракчеев, И. С. Фельдблюм, И. К. Викулов, А. М. Крол, В. Б. Степанищев, А. Г. Михальченков, Д. Г. Арапов, В. А. Красуцкий, Л. Н. Гутник и продолжатели традиций НПП «Исток» А. А. Борисов, С. А. Зайцев, С. В. Щербаков, В. Г. Калина, К. Г. Симонов, В. И. Новоселец, С. А. Перегонов, В. А. Парилов, А. В. Потапов, Ю. А. Будзинский, Л. Е. Гуревич, П. М. Мелешкевич, В. Н. Батыгин, А. С. Котов, Б. Ф. Горбик, В. И. Зубков, В. Д. Гриднев, Е. В. Истомин, К. Б. Джурицкий и др.

Руководителям «Истока» и его подразделений был посвящен не один выпуск раздела «История» научно-технического сборника «Электронная техника», сер. 1, «СВЧ-техника». Мы продолжим свои повествования в этом направлении.

С благодарностью отметим, что большую работу в издании сборника «СВЧ-техника» под руководством доктора технических наук А. А. Борисова, его заместителей директора по научной работе В. С. Щербакова, главного научного сотрудника С. А. Зайцева выполняют начальник отдела научно-технической информации – ответственный секретарь сборника «СВЧ-техника» В. П. Стебунов и редакционная коллегия.

С особой благодарностью отметим работу заместителя начальника ОНТИ Антонины Яковлевны Аксеновой, начальника редакционно-издательского сектора Людмилы Николаевны Хоточкиной, сотрудниц Л. В. Барабановой, Л. А. Земсковой, Т. В. Лазаревой, В. А. Семиной.

АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ ШОКИН



А. И. Шокин

Александр Иванович Шокин – один из тех людей, чья титаническая работа в различных областях человеческой деятельности не поддается простому осмыслению. Просматривая, даже в общих чертах, его дела, невольно возникает вопрос: неужели это все было по силам охватить одному человеку. Нужно было обладать недюжинным здоровьем, колоссальной внутренней энергией, трудолюбием, решительностью и верой в свою правоту, чтобы на протяжении четверти века самому двигаться вперед и вести за собой Министерство электронной промышленности Советского Союза.

Свою трудовую деятельность он начал слесарем в авторемонтной мастерской при МВТУ. Затем работал мастером на заводе автоматики и точной электромеханики, потом ведущим инженером на московском заводе «Электронприбор» и чуть позднее – руководителем первой отечественной автоматизированной системы управления – торпедного автомата стрельбы. На этих первых должностях и проявились незаурядные организаторские способности

А. И. Шокина. За успехи в разработке зенитного автомата стрельбы для первого крейсера советской постройки «Киров» 30-летний Александр Иванович был награжден орденом Ленина.

В промежутке между двумя мировыми войнами появилось новое направление науки и техники – радиоэлектроника. Стали разрабатываться системы вооружений с электронным управлением: радиолокационные станции, гидролокаторы, системы наведения для бомб, торпед и управляемых

снарядов. После образования в Народном комиссариате оборонной промышленности Главного управления военных приборов и телемеханики А. И. Шокина назначают заместителем начальника и главным инженером Главка. С этого момента вся его деятельность будет связана с организацией отечественной науки и производства. В годы Великой Отечественной войны он активно работает уполномоченным Наркома по изготовлению боеприпасов на московских заводах, а с 1943 года – во вновь созданном Совете по радиолокации при ГКО, результаты работы которого проявились в оснащении армии и флота отечественной радиолокационной техникой.

Последующие годы отмечены активной деятельностью А. И. Шокина на постах заместителя министра промышленности средств связи, министра радиотехнической промышленности, с 1961 года председателя Государственного комитета по радиоэлектронике.

20 октября 1959 газета «Правда» публикует его статью «Электронная вычислительная техника и автоматизация производства», которая открывает новую эпоху в отечественном приборостроении. Через год после эпохального космического полета Ю. А. Гагарина вышло Постановление Совмина СССР «О развитии радиоэлектроники в стране», основную часть которого подготовил Александр Иванович Шокин.

В 1965 году было образовано Министерство электронной промышленности СССР, и в течение 20 лет им руководил А. И. Шокин. Это позволило создать в стране единую отрасль – электронную промышленность, объединяющую сотни предприятий, НИИ, заводы и КБ, расположенные на территории страны. При непосредственном участии А. И. Шокина велись разработки многих изделий военного и ракетно-космического назначения.

Уже изначально основной прорыв А. И. Шокиным в развитии электроники был сделан в направлении полупроводниковых приборов. Немногим более десяти лет потребовалось министерству, чтобы в корне перевернуть отношение руководителей страны и народа к отечественным бытовым полупроводниковым приборам. Он направил максимум своих усилий и усилий руководимых им коллективов на то, чтобы калькуляторы, радиоприемники, телевизоры, вычислительные машины, магнитофоны, микроволновки, не хуже зарубежных, производились на отечественных заводах. Отечественная полупроводниковая электроника вошла во все сферы жизни и деятельности советских людей.

В период управления А. И. Шокиным отраслью при каждом НИИ и КБ были образованы опытные заводы, что позволило создать унифицированные параметрические ряды изделий электронной техники; был организован серийный выпуск лазеров и мазеров в различных частотных диапазонах; большой импульс получило производство товаров культурно-бытового назначения (калькуляторы, магнитофоны, термоса и т. п.). Существенное финансирование получили ленинградский завод «Светлана», московский МЭЛЗ, фрязинский ЗПП, киевский «Орион», флагман электроники СВЧ НПП «Исток».

Мощными темпами стал развиваться вновь образованный город микроэлектроники – Зеленоград, в котором было создано единственное в своем роде научно-техническое объединение – Научный центр, включающий в себя несколько НИИ с опытными заводами и вычислительный центр. Подготовкой кадров для отрасли занимались Московский институт электронного машиностроения (МИЭМ) и созданный А. И. Шокиным в Зеленограде Московский институт электронной техники (МИЭТ). О теплом отношении министра к МИЭТу говорит тот факт, что еще при его жизни у входа в МИЭТ был установлен бюст дважды Герою Социалистического Труда А. И. Шокину.

Огромное внимание Александр Иванович Шокин уделял НПП «Исток». Хорошо разбираясь в людях, в 1962 году он поддержал выдвижение на должность генерального директора «Истока» С. И. Реброва, который четверть века руководил предприятием и вывел его на передовые позиции в мировой электронике СВЧ. С большим уважением он относился к нашим выдающимся ученым, разработчикам, конструкторам, технологам, рабочим разных специальностей. Трудовой коллектив НПП «Исток» он очень ценил за профессионализм, высокую самоотдачу и выдающиеся достижения, любил посещать наше предприятие. А. И. Шокин лично награждал коллектив предприятия орденами Ленина и Трудового Красного Знамени. Заботливо относился он к подрастающему поколению, в том числе и к подготовке новых профессиональных кадров – при его поддержке на базе «Истока» был организован завод-втуз, а позднее филиал МИРЭА.

Академик Н. Д. Девятков отмечал, что, наряду с развитием работ по вакуумной электронике, в стране, и в частности на «Истоке», стала зарождаться полупроводниковая тематика. Уже в конце 40-х годов на предприятии, в лаборатории А. В. Красилова, были созданы и освоены в производстве первые отечественные полупроводниковые приборы СВЧ – германиевые детекторные и смесительные диоды для радиолокации. Разработчики диодов А. В. Красилов и А. И. Мельников стали лауреатами Сталинской премии. В феврале 1949 г. А. В. Красилов и его дипломница С. Г. Мадоян впервые в стране наблюдали транзисторный эффект, публикация об этом была в ноябре 1949 г. в закрытом сборнике трудов 22-й научно-технической конференции. С этого времени работы по полупроводниковой технике развивались стремительно. В 1950 г. экспериментальные образцы германиевых транзисторов были созданы в ЛФТИ (Ленинград) и в ФИАН (Москва). К 1962 году транзисторами занимались уже более десяти предприятий страны, номенклатура приборов составляла десятки типов, а объем выпуска измерялся миллионами. В Москве был организован первый в СССР институт полупроводников (НИИ «Пульсар»). Туда из «Истока» была переведена лаборатория А. В. Красилова в полном составе. Бюст «истоковца» А. В. Красилова установлен на входе в НИИ «Пульсар».

После открытия в 1959 г. учеными «Истока» А. С. Тагером, А. И. Мельниковым, А. М. Цебевым и дипломником Г. П. Кобельковым явления генерации и усиления электромагнитных волн с помощью полупроводниковых диодов, которое и по сей день является единственным открытием в области электроники СВЧ, зарегистрированным в СССР, А. И. Шокин с большим интересом следил за развитием этого направления. Он активно содействовал созданию на «Истоке» подразделения, которое начало разрабатывать не только лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и другие полупроводниковые приборы, но и устройства СВЧ на их основе. Правоту министра доказало время: современные диоды и транзисторы, разрабатываемые в НПП «Исток», лучшие в России.

Одна из самых мощных поддержек НПП «Исток» А. И. Шокиным заключалась в том, что именно наше предприятие он выбрал для выполнения важнейшей государственной программы «Союз – Синтез».

Товары культурно-бытового назначения, выпускаемые в НПП «Исток»: магнитофоны «Электроника» и термоса – были признаны лучшими в стране, получали награды на международных выставках, разбирались в магазинах всей страны молниеносно.

Помимо научно-производственной деятельности Александр Иванович занимался проблемами города Фрязино. За его бытность были построены десятки жилых домов, детских садов, две базы отдыха, профилакторий, Дворец культуры, спорткомплекс, реконструирован пионерский лагерь.

Высоко оценивая огромный вклад А. И. Шокина в развитие нашего предприятия и инфраструктуры наукограда Фрязино, улучшение жизненных и бытовых условий сотрудников

предприятия, откликаясь на обращение конференции трудового коллектива предприятия, руководство АО «Российская электроника» приняло решение после преобразования ФГУП в акционерное общество присвоить АО «НПП «Исток» имя Александра Ивановича Шокина.

АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ ЗАХАРОВ

Исполнилось 110 лет со дня рождения директора «Истока» А. А. Захарова. В 2012 году издательство «МЕДПРАКТИКА» выпустило в свет книгу «Андрей Андреевич Захаров – полвека в электронике», приуроченную к вековой годовщине выдающегося организатора отечественной электронной техники. Книгу открывает раздел «К читателю», в котором генеральный директор АО «НПП «Исток» им. Шокина» доктор технических наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ А. А. Борисов рассказал о выдающемся «истоковце». «Андрей Андреевич Захаров был одним из первых руководителей нашего предприятия. Он возглавил НИИ-160 в ноябре 1945 года и проработал до февраля 1947 года. Второй раз А. А. Захаров возглавлял наш институт в 1952 – 1953 годах, работая уже одновременно первым заместителем министра и начальником Главного управления Министерства промышленности средств связи (МПСС). Этот уникальный случай совмещения одним человеком одновременно трех должностей объяснялся необходимостью срочного решения проблемы создания виброустойчивых пальчиковых радиоламп для отечественных систем управления зенитными ракетами. Потребовались новые подходы к микроминиатюризации электровакуумных приборов и повышению их качества. Тогда Андрей Андреевич предложил поручить выполнить эту работу «Истоку» и перевел из Ленинграда на наше предприятие главного технолога завода «Светлана» Н. В. Черепнина. В короткие сроки сотрудниками предприятия были разработаны виброустойчивые миниатюрные пальчиковые лампы, которые впоследствии нашли широчайшее применение не только в оборонной отрасли, но и практически во всех типах отечественных радиоприемников и телевизоров. В этот же период во Фрязино была проведена электричка, стало активно строиться жилье, ученые и сотрудники предприятия получили ряд льгот. Мы высоко ценим вклад Андрея Андреевича Захарова в развитие предприятия «Исток» и всей отечественной электроники».



А. А. Захаров

В упомянутую книгу включены воспоминания А. А. Захарова, материалы из его архива, в том числе и адресованные ему письма, а также многочисленные воспоминания о нем руководителей предприятий и министерств СССР.

Воспоминания Ивана Михайловича Панаса

Я пришел на предприятие в 1952 году. Директором тогда был А. А. Захаров. Андрей Андреевич меня принял как молодого специалиста, внимательно расспросил, где я учился, какая у меня была дипломная работа. Я окончил механический факультет Львовского политехнического института, а диплом у меня был с конструкторским уклоном. Андрей Андреевич подумал и сказал: «Я Вас направлю в КБ». Уже тогда

меня удивило, как внимательно ко мне отнесся руководитель такого высокого ранга. Проработав в КБ несколько месяцев, опять прихожу к Андрею Андреевичу и говорю: «Наверное, мне надо получить вторую специальность по электронике». Андрей Андреевич подумал и отвечает: «Правильно, давай пиши заявление в Московский энергетический институт, а я подпишу ходатайство, чтобы тебя приняли сразу на 3-й курс с пересчетом экзаменов».

Это было мое второе знакомство с директором А. А. Захаровым. В дальнейшем мы часто встречались, когда я стал директором опытного завода при НПП «Исток» и завода «Рений». Андрей Андреевич прошел хорошую школу производственника: был директором ленинградского завода имени Козицкого, директором НПО «Светлана», знал всю структуру организации производства, инструментальное хозяйство, механическую обработку, подготовку производства. Андрей Андреевич часто приезжал на наше предприятие. Его было очень трудно обмануть. Меня всегда поражало, что он знал, где искать недостатки, куда пойти по территории, чтобы увидеть самые «злачные» места и обратить на это внимание. Андрей Андреевич мог вовремя подсказать и потребовать устранить недостатки...

Наш завод, когда я был директором, ежегодно занимал классные места, всего около 50 раз, почти каждый квартал. Андрей Андреевич наравне с нами радовался этим успехам и обязательно поздравлял. Если не мог или не успевал поздравить, например был занят подготовкой к коллегии Министерства электронной промышленности, то обязательно потом поздравлял по телефону. Это придавало мне, как директору, дополнительные силы...

Он знал и помнил очень многих сотрудников «Истока» и всегда интересовался по телефону или при встрече, как здоровье и как идут дела у того или иного человека. Меня поражала его феноменальная память. Он мог рассказывать часами об отечественной истории электронной техники начиная с периода работы на ленинградском заводе имени Козицкого и при этом помнил даты торжественных событий, ввода в действие важных объектов и фамилии участвующих в этих свершениях сотрудников.

10 ноября 1997 года, когда Андрею Андреевичу исполнилось 85 лет, мы собрались у него во главе с последним министром МЭП СССР В. Колесниковым. Приехали Маршал СССР Язов, заместители министра МЭП СССР Илюшин, Казаков, Суворов, Грибачев и вся наша старая компания руководителей крупных предприятий и Главных управлений Министерства электронной промышленности СССР: Козлов, Калашиников, Марин, Лобачев. Получилось как бы прощальное заседание руководства нашей отрасли перед ее окончательным развалом. Мы хорошо посидели, о многом вспомнили.

Мне кажется, Андрей Андреевич прожил счастливую жизнь. Он увидел результаты своего труда, увидел, что его усилия не были напрасными.

В начале 1999 года, в канун юбилея генерального конструктора, а перед этим генерального директора НПО «Исток» Сергея Ивановича Реброва, редактор городской газеты «Ключь», бывшая сотрудница отдела 100 Вера Ивановна Юркова предложила корреспонденту газеты А. К. Балыко взять интервью у С. И. Реброва. Не было полной уверенности, что генеральный конструктор даст на то свое согласие. Однако С. И. Реброву это предложение понравилось. Сергей Иванович примерно по 3-4 часа каждый вечер отвечал на вопросы, затем набранный на компьютере текст распечатывался и на следующий день в положенный час представлялся воочию С. И. Реброву. Он тщательно его редактировал и после этого продолжал свои воспоминания.

Из интервью с Сергеем Ивановичем Ребровым

Расскажу о своих предшественниках, о тех, кого я застал, начав работать на предприятии НИИ-160 в 1952 году. Прежде всего о директоре предприятия А. А. Захарове. Андрей Андреевич Захаров здравствует и поныне. В канун Нового года мы с ним обмениваемся поздравлениями по телефону. Он, конечно, был

незаявленным руководителем, работая на посту замминистра МПСС в чрезвычайно сложный период. Электронику курировал тогда Л. П. Берия. Нашему НИИ-160 в самом начале 50-х годов был передан важнейший государственный заказ на разработку пальчиковых приемно-усилительных ламп (ПУЛ) серии «Анод». До нас эту задачу пытался решить Московский электроламповый завод (МЭЛЗ), но работа у них, по-простому сказать, провалилась. Да и у нас поначалу воспроизводимость ламп была нулевой, а они очень требовались для системы управления первой советской «летающей крепости», бомбардировщика Ту-4. А. А. Захаров и позднее заменивший его на посту директора нашего института В. А. Гольцов создали в НИИ-160 отдел 200 специально по ПУЛам и назначили начальником Николая Васильевича Черепнина. Этот отдел численностью 900 человек был создан за одни сутки! Так в те годы исполнялись распоряжения Правительства СССР и дирекции НИИ. В частности, из нашего отдела 220 в отдел 200 перевели 15 инженеров. То же самое было проделано с другими отделами.

Тем не менее, работа пошла, но не так успешно, как всем хотелось бы. Л. П. Берия постоянно вызывал А. А. Захарова и требовал предложений по форсированию работы. Был случай, когда расстроенный А. А. Захаров вышел после разговора с Л. П. Берия в комнату его референта, взял чистый лист бумаги и начал думать, что еще попросить у всемогущего Лаврентия Павловича. Написал три пункта: 1. Повысить категоричность института. 2. Ввести дополнительный отпуск для сотрудников с ученой степенью по аналогии с Академией наук. 3. Провести во Фрязино электричку.

Особенно показательно было исполнение указаний властных структур на примере электрички – через два месяца к нашему городу уже подводили железнодорожные пути.

В конце концов серия «Анод» прошла удачно. Н. В. Черепнину удалось получить необходимую надежность и долговечность первых отечественных пальчиковых ПУЛ и начать их производство в требуемых огромных количествах (порядка сотен тысяч – миллиона ламп в год). В какой-то момент производство этих ламп было основным для нашего института. Но примерно с середины пятидесятых годов в стране стали разрабатываться новые радиолокационные системы и для них требовалась уже более широкая номенклатура СВЧ-приборов, в том числе полупроводниковые приборы...

...Возраст Андрея Андреевича перевалил за 85 лет, но он мог бы вспомнить много интересного о становлении отечественной электроники». Я готов организовать для этого Вашу встречу».

Поскольку само интервью с С. И. Ребровым готовилось для газеты, то предполагалось, что оно будет не очень большим. Только сейчас стало ясно, что нельзя было ограничивать Сергея Ивановича в его воспоминаниях. А тем более не поддерживать его предложение о встрече с А. А. Захаровым.

Неоднократное упоминание имени Н. В. Черепнина в книге о А. А. Захарове и в интервью С. И. Реброва говорит о многом. Николай Васильевич был дружен с Андреем Андреевичем. В книге есть фотографии, где они запечатлены вместе. Интерес представляет и письмо Н. В. Черепнина к А. А. Захарову, датированное 10 октября 1997 г., где приведены воспоминания Н. В. Черепнина о пребывании им в Германии, в том числе на территории Западного Берлина, в 1945 году и связанные с этим проблемы при возвращении в СССР. Это письмо было опубликовано в сборнике «СВЧ-техника» (2021 г., вып. 1).

Воспоминание Александра Карповича Балыко

Однажды во время интервью с С. И. Ребровым я нашел генерального конструктора в подавленном состоянии и даже предложил перенести нашу беседу. Сергей Иванович поднял на меня красные от слез глаза и сказал: «Только что мне позвонили и сказали, что скончался бывший заместитель начальника Главного научно-технического управления (ГНТУ) Министерства электронной промышленности (МЭП)

СССР Сергей Васильевич Жигунов. Вы, конечно, его не знали, но, поверьте мне, он очень много сделал для нашего предприятия». Я скромно промолчал, хотя также был опечален этим неожиданным для меня трагическим известием, поскольку с С. В. Жигуновым встречался не раз и при довольно сложных обстоятельствах.

В 1978 году Ленинскую премию получили сотрудники «Истока» доктор технических наук А. С. Тагер и кандидат технических наук А. И. Мельников, главный научный сотрудник НИИ «Пульсар» В. М. Вальд-Перлов и президент АН ЛССР А. К. Пожела, принимавшие активное участие в создании лавинно-пролетных диодов (ЛПД). Работая в лаборатории А. С. Тагера и возглавляя совет молодых ученых и специалистов (СМУС) «Истока», я предложил Александру Семеновичу выдвинуть на соискание премии Ленинского комсомола коллектив молодых специалистов «Истока» (в возрасте не старше 33-х лет), работавших в направлении разработки генераторов шума на ЛПД (ГШЛПД). Академик Н. Д. Девятков, курирующий СМУС, внимательно выслушав наше с А. С. Тагером предложение, поддержал его и только посоветовал не ставить в известность об этом С. И. Реброва, поскольку у генерального директора было много более важных дел. О выдвижении этой работы академик пообещал поговорить с министром МЭП СССР А. И. Шокиным, с которым он тесно сотрудничал на протяжении многих лет еще со времени их совместной командировки в Берлин в 1945 году. После разговора с министром работу решено было выдвигать по «закрытой» тематике, поскольку она была посвящена разработке в те годы «секретных» ГШЛПД. Министр также указал на необходимость включения в авторский коллектив молодых специалистов с предприятий Зеленограда. К этому городу – спутнику Москвы он питал особые чувства (бюст дважды Героя Социалистического Труда А. И. Шокина был установлен при входе в МИЭТ).

Число и персоналии молодых авторов от «Истока» определяли создатели отечественных ГШЛПД А. С. Тагер, А. И. Мельников, Ф. М. Шапиро, И. А. Саломатин. Эти же ученые поручили мне возглавить авторский коллектив, съездить в Зеленоград и передать руководителям НИИ, работавших в тесном контакте с НПО «Исток», пожелания министра. Поскольку я закончил МИЭТ, то знал многих сотрудников из числа выпускников МИЭТ и некоторых руководителей НИИ, которые в недавнем прошлом параллельно с их административной работой читали нам лекции. Особенно памятна была встреча с моим преподавателем, директором НИИ тонкой технологии (НИИТТ) Э. Е. Ивановым, который, как мне рассказали до этого однокурсники, вскоре должен был возглавить Научный центр в Зеленограде. Эдуард Евгеньевич подготовился к встрече и назвал фамилии ряда молодых специалистов, в том числе и из его НИИТТ, имеющих отношение к проблемам нашей работы.

В тот же день уже в Москве я познакомился и с куратором нашей работы от МЭП СССР С. В. Жигуновым.

Когда оформление работы уже близилось к завершению, Сергей Васильевич по телефону сообщил мне, что срочно (завтра!) необходимо привезти сброшированный текст работы. «Министр А. И. Шокин, – сказал он, – распорядился по поводу выдвижения нашей работы не собирать коллегия МЭП СССР, а обойти членов коллегии и подписать решение в явочном порядке». Он продиктовал мне текст решения коллегии. Я показал текст А. С. Тагеру и начальнику отдела 100 И. С. Фельдблюму, который сделал несколько стилистических правок и несколько сурово сказал, что такой важный документ надо обязательно напечатать на хорошей бумаге. Он вынул из стола два листа белой «финской» бумаги. До этого я такой бумаги никогда не держал в руках (!) Секретарша отдела испытала те же чувства, поскольку в небольшом тексте умудрилась сделать две ошибки. Хорошо, что был еще второй лист.

На следующий день, охраняемый вооруженным спецкуррьером, я повез в Москву нашу «закрытую» работу и отпечатанный текст решения коллегии МЭП СССР. С. В. Жигунов прочитал напечатанное решение, взял красную стиральную резинку и начал усиленно стирать несколько фамилий из состава

молодых авторов и название предприятия. Мне он объяснил, что начальник ГНТУ В. М. Пролейко присутствовал при разговоре на повышенных тонах министра А. И. Шокина (дважды Героя Социалистического Труда) с директором Научного центра Э. Е. Ивановым (Героем Социалистического Труда), зная крутой характер Александра Ивановича и чтобы не повредить выдвигаемой на премию работе молодых ученых, он распорядился убрать из авторского коллектива молодых сотрудников НИИТТ с упоминанием названия института. Так на моих глазах под красной резинкой оказались «похоронены» два молодых кандидата в лауреаты, а решение коллегии МЭП на «финской» бумаге превратилось в страничку из дневника школьника со стертой двойкой. С этим документом я продолжил свои дальнейшие действия.

Конфликт «на верху» МЭП СССР, естественно, стал известен на всех этажах министерства. Во избежание возможных осложнений, подписи под решением коллегии В. М. Пролейко распорядился начать собирать с Первого Главного управления (ГУ-1), поскольку НПО «Исток» входил в состав этого ГУ. Сняв трубку, С. В. Жигунов позвонил начальнику ГУ-1 С. Г. Калашиникову, на что тот сказал, что хотел бы сам познакомиться с работой и составом молодых специалистов. Лицо Сергея Васильевича сразу посуровело. Дело в том, что МЭП СССР и ГУ-1 МЭП СССР находились в разных зданиях, и разделяла их ни много ни мало площадь Дзержинского, на которой расположено зданием КГБ СССР, усиленно охраняемое и на земле, и в подземном переходе. Спецкурьер «Истока» уже уехал, и быстро перенести без охраны «секретную» работу из здания в здание на расстоянии 200 метров не было возможности. Между тем сроки подачи работы в Комитет по премиям Ленинского комсомола в ЦК ВЛКСМ истекали именно в этот день. И здесь С. В. Жигунов принял непростое для чиновника высокого ранга решение. Взяв мою тряпичную сумку, он вложил туда нашу «секретную» работу и решение коллегии МЭП со словами напутствия: «Если в подземном переходе к тебе начнет приближаться милиционер или человек в штатском, беги, что есть мочи, к выходу на улицу – к зданию ГУ-1. Если тебя задержат, то премии неминуемо придет конец, тебя изрядно потаскают, а меня же могут даже посадить». После такого напутствия, я ни жив, ни мертв, но все же без осложнений преодолел подземку площади Дзержинского. С. Г. Калашиников был уже занят другими неотложными делами, поэтому, бегло пролистав нашу работу, второпях поставил подпись под решением коллегии и со словами: «С богом!» – отпустил меня. На обратном пути к зданию МЭП СССР я уже решил не рисковать и не стал спускаться в подземку. Обошел площадь Дзержинского, по которой несся нескончаемый поток машин, нашел все же наземный переход, благополучно возвратился в МЭП и был сердечно встречен Сергеем Васильевичем Жигуновым.

Но была получена только первая подпись членов коллегии, а их на решении требовалось девять от начальников ГУ и семь от заместителей министра. К моему счастью, все начальники находились в здании МЭП СССР. Подписи начальников ГУ я получил сравнительно быстро. Мне показалось, что как-то внимательно на меня посмотрел только начальник ГУ А. А. Маклаков, но вопросов, к счастью, он не задал. Впоследствии я узнал, что раньше он был одним из руководителей опытного завода при «Истоке». Затем С. В. Жигунов привел меня к так называемому «министерскому коридору», охраняемому двумя вооруженными людьми, где находились кабинеты министра и его заместителей, и сказал: «Пока не подпишешь решение – не выходи, назад в этот коридор тебя уже не пропустят». Почти все заместители были на месте, и они, практически не глядя, подписали решение коллегии. Оставался только А. А. Захаров. Его секретарша сказала: «Ждите, Андрей Андреевич сейчас на объекте». Замминистра приехал ближе к обеду. Я робко вошел в его кабинет и без слов передал ему решение коллегии. Он его прочитал, посмотрел на меня и единственный из почти двух десятков руководителей МЭП СССР задал вопрос: «Ну как идут дела на “Истоке”?» Я от волнения и неожиданного вопроса самого заместителя министра СССР просто проглотил язык и едва промолвил первое, что пришло в голову: «Хорошо». «Вот Вы и отчитались за деятельность всего коллектива “Истока”», – с улыбкой сказал А. А. Захаров.

Вернувшись во Фрязино, я узнал от А. С. Тагера, что Андрей Андреевич Захаров дважды руководил нашим предприятием, поэтому-то он и поинтересовался у молодого сотрудника «Истока» о делах родного ему коллектива.

САВЕЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ЗУСМАНОВСКИЙ



С. А. Зусмановский

6 августа 1993 года в «истоковской» многотиражке «За передовую науку» на первой странице была помещена статья К. Г. Симонова и Ю. А. Вецгайлеса «В памяти нашей их имена», которую приводим ниже в полном виде.

4 августа 2003 года в той же газете, но уже по случаю 100-летия легендарного «истоковца» была опубликована статья К. Г. Симонова «С. А. Зусмановский – корифей отечественной электроники» с некоторыми добавлениями к первой статье.

Карл Георгиевич Симонов – легендарный сотрудник «Истока». Будучи еще молодым специалистом, он выдвигался на премию Ленинского комсомола в области науки и техники. В 1969 году в диссертационном совете НПП «Исток» с успехом защитил кандидатскую диссертацию. Практически сразу был назначен начальником отдела научно-производственного комплекса № 1, в то время одного из самых крупных научных подразделений «Истока». В 1982 году К. Г. Симонов, пройдя «огонь и воду» после двух защит, сначала в диссертационном совете НПП «Исток», а затем в научном совете Московского инженерно-физического института (МИФИ), стал доктором технических наук. Обладатель почетного звания «Заслуженный изобретатель РСФСР». В 1999 году генеральный директор Александр Николаевич Королев и Карл Георгиевич Симонов стали первыми на «Истоке» лауреатами Государственной премии Российской Федерации. Фотографии их вместе с Президентом России украшают кабинеты подразделений «Истока».

Юлий Альфредович Вецгайлес – легендарный сотрудник «Истока». Выдающийся разработчик, лауреат Государственной премии СССР, позднее начальник тематического отдела «Истока». Ученый секретарь ГНПП «Исток». Историческая справка: «К началу 50-х годов в НИИ электронной техники («Истоке») были созданы первые отечественные мощные приборы СВЧ: Ю. А. Вецгайлесом – магнетроны с выходной мощностью 2 МВт в 10-см диапазоне длин волн; Ю. А. Искренко – быстоперестраиваемые магнетроны этого диапазона; Э. А. Гельвичем – магнетроны нового уровня – в 3-см диапазоне длин волн с быстрой перестройкой частоты».

В памяти нашей их имена.

С. А. Зусмановский – корифей отечественной электроники

К. Г. Симонов, Ю. А. Вецгайлес

Выдающемуся ученому, дважды лауреату Государственной премии СССР, доктору технических наук, профессору С. А. Зусмановскому – одному из основателей отечественной электронной техники и ГНПП «Исток» – 1 августа 1993 г. исполнилось бы 90 лет.

Савелий Александрович свыше 50 лет работал в области электронной техники. До войны длительное время он возглавлял отраслевую вакуумную лабораторию на ленинградском заводе «Светлана», которая в то время была единственным научно-исследовательским центром электровакуумной промышленности.

Область мощного радиовещания в стране своим развитием обязана трудам С. А. Зусмановского, который был научным руководителем, исследователем и конструктором новых типов генераторных ламп больших мощностей, работающих в различных диапазонах частот. За разработку электровакуумных приборов для систем вооружения в 1941 году С. А. Зусмановскому была присуждена Сталинская (позже Государственная) премия.

В 1943 году Савелию Александровичу была поручена организация научной работы в НИИ-160, ПЕРВОМ научно-исследовательском институте страны в области электронной техники, во Фрязино, и он в течение пяти лет, в период становления института, был его научным руководителем.

В 1943 – 1953 гг. С. А. Зусмановский разработал ряд импульсных магнетронов и быстро перестраиваемых магнетронов непрерывного действия.

Под руководством С. А. Зусмановского с 1954 по 1973 г. проводилась большая работа по созданию теории и научных основ конструирования мощных усилительных клистронов. Был создан ряд приборов этого типа с уникальными параметрами. К ним относятся: первый отечественный сверхмощный клистрон мощностью 20 МВт в импульсе, предназначенный для питания Харьковского линейного ускорителя электронов (50-ти одновременно работающих клистронов), сверхмощный 30-МВт клистрон для питания линейного ускорителя с большим током луча в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова, сверхмощный клистрон с полым лучом и другие.

Впервые в мире С. А. Зусмановский в 1961 г. разработал 4-МВт многолучевой клистрон с большой энергией в импульсе, который стал основой для создания многих отечественных многолучевых клистронов различного назначения.

За работы по созданию мощных усилительных клистронов С. А. Зусмановский в числе других ученых в 1970 году был во второй раз удостоен Государственной премии СССР.

Возглавляя многие годы научно-исследовательские подразделения, являясь одним из ведущих разработчиков СВЧ-приборов, С. А. Зусмановский внес неоценимый вклад в становление «Истока» как ведущего предприятия страны.

Талантливый инженер С. А. Зусмановский являлся автором более 120 научных трудов, в том числе 50 изобретений.

О важности его открытий, например, говорит такой факт, что впервые в мире им был предложен многолучевой клистрон, который стал основой создания многих отечественных многолучевых клистронов различного назначения. В настоящее время к многолучевым клистроном проявляют интерес многие зарубежные фирмы. Фундаментальные работы С. А. Зусмановского в области теории мощных многорезонаторных клистронов являлись основополагающими для отечественной электроники.

Савелий Александрович был профессором Московского физико-технического института и заведующим кафедрой Московского института электронного машиностроения. Он читал лекции виртуозно, и сложный материал в сопровождении юмора и анекдотов преподносился студентам доходчиво и понятно.

Интересно, что, когда нас, студентов Физтеха, он вызывал к доске и предлагал вычислять сложные интегралы, мы обычно успешно справлялись. Затем он предлагал студентам извлечь квадратный корень из простого числа, что (увы!) многим оказывалось не по силам. Савелий Александрович улыбаясь говорил: «Эх Вы! Вас Физтех, видимо, делает такими заумными, что даже квадратный корень Вы не можете извлечь».

С. А. Зусмановского отличала доброжелательность к людям, работающим рядом с ним. Они всегда видели в нем опору и поддержку. Он был для нас учителем, наставником, помогал преодолевать трудности в работе и жизни, пользовался большим уважением всех, кто его знал.

Хочется рассказать несколько случаев из жизни этого интересного человека. Как мы уже отмечали, остроумие и юмор были присущи Савелию Александровичу. Однажды один из высокопоставленных чиновников, недовольный результатами работы, спросил у него: «Как же так, Савелий Александрович, если технология производства приборов одинакова, то почему один прибор лучше, а другой хуже?» На что С. А. Зусмановский спокойно ответил: «Технология производства детей также одинакова, но один получился ученый, а другой – дурак».

Вспоминаем мы и как отмечалось 70-летие Савелия Александровича у него на даче по Волоколамскому шоссе. Когда мы приехали, все родные и знакомые были уже в сборе, среди именитых гостей – известный киноартист Павел Кадочников, родной брат жены Савелия Александровича, Зои Петровны. Запомнилось, как Кадочников уже после зачитывания приветственных адресов от многих предприятий Министерства электронной промышленности в кулуарах восторгался Савелием Александровичем: «Я, конечно, знал, что ты ученый, но, что такой известный и с таким мировым уровнем признания, даже и не предполагал!»

Скоротечна наша жизнь. Спасибо ей за то, что нам на пути встречаются такие люди, высокоодаренные, умные, интересные и знаменитые, как наш «истоковский» основоположник отечественной электроники СВЧ Савелий Александрович Зусмановский.

ГЛЕБ АЛЕКСАНДРОВИЧ МЕТЛИН



Г. И. Метлин

Несколько лет назад ведущий инженер отдела 240 «Истока», депутат фрязинского Совета депутатов Наталия Михайловна Галина обратилась к нам с просьбой помочь в публикации воспоминаний ведущего технолога отдела 180 А. А. Горжановой. Ее воспоминания содержали около 50 страниц рукописного текста, поэтому поместить их, например, в газету мы просто не могли. Между тем в нашем научно-техническом сборнике «СВЧ-техника» была образована рубрика «История», и вместе с ней появилась возможность печатать материалы по истории отечественной электроники СВЧ. В этой рубрике мы стараемся придать гласности не только биографии ученых, но и воспоминания дорогих нам сотрудников «Истока». Ниже мы предлагаем отрывок из воспоминаний А. А. Горжановой, относящихся к легендарному нашему ученому, лауреату Ленинской премии Глебу Александровичу Метлину.

Воспоминания Александры Андреевны Горжановой

История аналитической лаборатории в отделе 180 «Истока» знаменательна, поскольку лаборатория ученого всегда представляет интерес для науки и сохраняет притягательную силу для последователей и продолжателей ее дел. Родословная лаборатории уходит в тридцатые годы 20 века, когда был создан завод «Радиолампа». В 1941 году, в момент эвакуации завода, большую часть имущества и сотрудников завода пришлось эвакуировать для организации лаборатории на новых местах в городах Ташкенте и Уфе.

Позже, уже в 1944 году, при создании аналитической лаборатории на «Истоке» оказалось, что у нас есть неплохой набор химических реактивов, состоящий примерно из 650 наименований. Наряду с отечественными, здесь были Мерковские и Коньбаумские реактивы, полученные в 1936 – 1937 гг. по договору о поставке оборудования и материалов для организации производства металлических приемно-усилительных ламп на заводе «Радиолампа». Этот набор реактивов оказал сотрудникам лаборатории неоценимую услугу, особенно в первые годы после войны, при выполнении важнейших правительственных заданий. Кроме реактивов была передана в значительных количествах столь дефицитная в 1944 году химическая посуда, которой хватило на несколько лет, а также лабораторная мебель, служившая нам более трех десятков лет. Получен был также ряд приборов, таких, как прибор для электроанализа, фотоэлектроколориметр, потенциометр, спектрограф Хильгер, комплект аналитических весов, позволивший создать хорошую весовую комнату, и некоторые другие приборы. После окончания Великой Отечественной войны все это достать было трудно, поэтому то, что мы имели, мы посчитали настоящим кладом, позволившим организовать неплохо оснащенную аналитическую лабораторию и сходу приступить к работе.

Конечно, все это было бы не так ценно при отсутствии людей, но из лаборатории завода № 191 к нам пришла хорошо организованная группа сотрудников во главе с начальником лаборатории этого завода Метлиным Глебом Александровичем, который, будучи в последующем начальником отдела 180 нашего института НИИ-160, по совместительству возглавлял до 1946 года и аналитическую лабораторию и был первым ее руководителем.

В группе сотрудников были хорошо обученные химики-аналитики, уже имеющие опыт работы от восьми до десяти лет. Первыми работниками была Рубинова Софья Исаковна – опытный химик-аналитик по анализу силикатов и лаборанты: Ольховская Анна Андреевна, Подгурская Евдокия Степановна, Тужикова Александра Александровна, Гурова Анна Ивановна. Этот коллектив уже мог проводить анализ никеля на содержание марганца, железа, кремния, меди, магния; анализ углеродистых и легированных сталей; анализ бронз и латуней; анализ стекол ряда составов; анализ воды, топливных масел, двойных и тройных карбонатов; анализ болотной руды, водяного газа, производимого в то время газовым цехом предприятия, и ряда других материалов с точностью определения, которую обеспечивали существующие в то время методы анализа и приборы.

В послевоенные годы на наше предприятие специальным постановлением Правительства СССР было возложено решение большого круга ответственных задач. В частности, приказом министра МПСС СССР необходимо было:

1. Разработать высокоэффективные катоды для магнетронов с плотностью тока 50 А/см^2 в импульсном режиме и 1 А/см^2 в постоянном режиме, а также вторично-эмиссионные катоды с плотностью тока 5 А/см^2 . Главным конструктором этой работы был назначен начальник отдела 180 Метлин Г. А., а приказом по предприятию его заместителем – Царев Борис Михайлович. Для разработки катодов при отделе 180 была организована специальная лаборатория. Ее первым начальником была Хенкина Хена Геселевна.

2. Разработать пять типов полупроводниковых приборов. Главным конструктором работы был назначен Красилов Александр Васильевич, а его заместителем Метлин Г. А. Для разработки этих приборов в отделе 180 также была создана специальная лаборатория, которую возглавил Красилов А. В. (Впоследствии А. В. Красилов с сотрудниками перешел в Москву в НИИ «Пульсар». В настоящее время бюст Александра Васильевича Красилова, как основателя предприятия, установлен в фойе при входе в головное здание НИИ «Пульсар».)

3. Одновременно это же постановление обязывало Министерство цветной металлургии разработать для электровакуумной промышленности технологию получения бескислородной меди, а также металлических порошков циркония и тория для разработки газопоглотителей и чернящих покрытий. На аналитическую лабораторию, которую с 1947 года, после перехода Г. А. Метлина на другую работу, возглавила кандидат химических наук Берта Давыдовна Луфт, ответственные работы накладывали новые задачи по созданию методов контроля материалов и технологических процессов. В частности, в то время медь анализировалась только на содержание основного компонента, то есть меди. Создание бескислородной меди потребовало определения примесей многих элементов: висмута, олова, мышьяка, серы, фосфора, цинка, свинца, сурьмы, железа, никеля, кремния при содержании их до 0,001 %. Кроме того, использование чистого никеля, необходимого для создания высокоэффективных катодов, также потребовало определение в нем примесей алюминия, висмута, железа, кобальта, кремния, марганца, меди, олова, свинца, сурьмы, цинка и активирующих присадок: кальция, кремния, магния, стронция, бария.

Без всякого сомнения, первые качественные результаты в нашей стране в области катодной электроники СВЧ были получены под руководством дорогого и уважаемого нами Глеба Александровича Метлина.

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ САВЧЕНКО



В. И. Савченко

Роль Владимира Петровича Савченко в истории «Истока» и города Фрязино в период с 1975 по 2005 г. трудно переоценить.

В. П. Савченко родился в 1952 году в Тульской области. После окончания Ленинградского электротехнического института пришел на «Исток», где сразу же проявил себя как талантливый молодой специалист и хороший организатор. Начальник отдела Герой Социалистического Труда Лариса Анатольевна Парышкуро уже после первого знакомства с новым инженером отделения 17 предвещала ему большое будущее, что в конце концов и произошло.

Складывается впечатление, что Владимира Савченко просто ждали в отделении 17, поскольку практически сразу его избрали секретарем комсомольской организации крупнейшего подразделения «Истока». После защиты кандидатской диссертации под руководством профессора МЭИ Игоря Всеволодовича Лебедева его назначили начальником отдела в НПК-17. Немного позже, при негласной поддержке генерального директора «Истока» С. И. Реброва, комсомольцы избрали В. П. Савченко секретарем комитета ВЛКСМ предприятия. При содействии Л. А. Парышкуро, имевшей прямой выход на министра МЭП СССР А. И. Шокина, он становится одним из руководителей штаба по строительству во Фрязино молодежного жилищного комплекса (МЖК). Следующим этапом роста В. П. Савченко стало избрание его секретарем парткома «Истока», затем – председателем Фрязинского городского комитета «Благоустройство» и руководителем движения по присвоению городу Фрязино статуса наукограда. Временный отход от общественно-политической работы произошел после назначения его директором Фрязинского НИИ «Циклон – Тест». Но уже в 1995 году его назначают руководителем Администрации города, а в 1996 году население Фрязино на всеобщих выборах избирает его главой города. В эти же годы В. П. Савченко защитил дис-

сертацию и стал доктором физико-математических наук, затем профессором и чуть позднее лауреатом Государственной премии Российской Федерации.

В важный и судьбоносный для города Фрязино период (1995 – 1996 гг.) внештатный корреспондент газеты «Ключь» А. К. Балыко обратился к главе города Владимиру Петровичу Савченко с вопросами, ответы на которые, на наш взгляд, и сегодня не потеряли своей актуальности.

– 1995-й год ушел в историю. Каким он был для города Фрязино и его жителей?

– Ушедший год был сложным и противоречивым, как, впрочем, и все последнее десятилетие. Были в нем и грустные, и светлые, радостные дни. Для меня такие дни связаны в основном с успешным исполнением принятых Администрацией города решений, направленных на улучшение жизни фрязинцев. Были праздники, и среди них наиглавнейший – 50-летие Победы советского народа над фашистскими захватчиками. Но было в году и немало грустных моментов. К ним я в первую очередь отнес бы уход из жизни дорогих наших ветеранов войны и труда П. С. Минейчева, А. М. Храпко, Н. И. Сафонова, А. Н. Ковтунова, Г. П. Паскина, К. В. Дубновой, В. И. Бацева, А. С. Тагера, А. А. Шеногина и других представителей легендарного поколения. Со многими из них мне довелось работать на «Истоке». Это были специалисты высочайшего уровня, душевные, отзывчивые люди, патриоты своего города. Это поколение не только отстояло страну в чудовищной войне, но, вернувшись домой, зачастую инвалидами, с огромным энтузиазмом и воодушевлением восстанавливало разрушенное хозяйство. Более того, их руками и светлыми умами были созданы совершенно новые для страны отрасли науки и техники, в том числе и наша родная электроника СВЧ. Грустно сознавать, что это героическое поколение советских людей покидает нас...

Могу заверить, что Администрация города делает и делает все, что в ее силах, чтобы, по возможности, меньше огорчать наших ветеранов. На протяжении всего года мы работали в тесном контакте с Советом ветеранов города, старались дойти до каждого человека. Порой ведь ветерану уже важны не столько материальные блага (люди они, как правило, скромные), сколько внимание и забота, а то и просто теплые слова. Надо честно сказать, что юбилейные мероприятия к 50-летию Победы заставили нас во многом пересмотреть деятельность Администрации, прежде всего, в плане более внимательного, человеческого отношения к просьбам ветеранов, да и всех жителей города. Я постоянно напоминаю об этом и своим сотрудникам Администрации.

Другая категория фрязинцев, требующая постоянного внимания и заботы со стороны властей, – это пенсионеры, которых в городе ни много ни мало – 13 тыс. человек. Не по своей вине многие из них оказались беспомощными в этой жизни, брошенными, по существу, на произвол судьбы. Между тем они честно проработали по несколько десятков лет на благо нашей страны, поддерживали ее высокий потенциал, создавали микроклимат в городе науки Фрязино, прославляли его на всю Россию и мир. Поэтому я считаю, что они не должны быть заложниками бесхозяйственности и произвола. И, как глава города, не могу позволить, чтобы этим людям вовремя не выдавали самое малое – пенсии.

Раз уж пошел разговор о ветеранах и пенсионерах, хочу остановиться на работе медицинских учреждений. Хотя, конечно, в целом состояние здравоохранения в городе – это особая тема для разговора. Что и говорить, подавляющая часть пациентов больниц и поликлиник – это люди старшего поколения. Как я уже отмечал, в городе сейчас проживает 13 тыс. пенсионеров, 2 тыс. инвалидов. Поэтому, помогая здравоохранению, мы тем самым помогаем лучше чувствовать себя нашим ветеранам, пенсионерам, инвалидам. Возьмите, например, лекарства. По российским законам 120 наименований лекарств выдаются в аптеках бесплатно. Администрация Московской области прибавила к этому списку еще 60 наименований. Мы же пошли дальше и увеличили это число еще на 100. Так что теперь фрязинцы могут

приобрести бесплатно почти 300 наименований лекарств, что, несомненно, является существенным подспорьем для скудных бюджетов многих горожан.

– Говорят, что о сильном главе города можно судить по его заботе о стариках и детях...

– Вашу мысль понял. Начну с того, что в результате десятилетия перестроек и реформ дети, пожалуй, пострадали больше других категорий жителей. Раньше государство выделяло колоссальные средства на обучение и гармоничное развитие детей, укрепление их здоровья, организацию отдыха. И в какой-то момент объем этих средств уменьшился во много раз. А дети ведь остались прежними, с их желанием нормально развиваться, играть, посещать спортивные секции и культурные мероприятия, со стремлением получать образование в соответствии со способностями, а не с размером кошельков родителей...

Для меня, много лет проработавшего на «Истоке» секретарем комитета ВЛКСМ и секретарем парткома КПСС, до сих пор непонятно, кому, например, мешали пионерские организации в школах. Ведь как бы то ни было, а они способствовали укреплению дисциплины, внимательному отношению к старшим и младшим, бережному сохранению школьного инвентаря, бескорыстной помощи школе, неуспевающим ученикам и т. д. Не все было идеально, но приносило определенный результат. По чьей-то команде пионерские организации были распущены, а заменить их оказалось нечем. Жалкие потуги сколотить скаутские группы остались лишь на бумаге да в газетных публикациях. Разрушили, безусловно, взрослые, а пострадали, как всегда, наименее защищенные – дети.

Надо сказать, что за те неполные два года, как я был назначен главой Администрации города, нам немало удалось сделать в этом направлении. Мы, прежде всего, пересмотрели концепцию развития образования с учетом особенностей города. На сегодня более шести тысяч фрязинцев учатся в семи городских школах и около тысячи – в колледже, техническом и медицинском училищах. Необходимо было найти те ключевые позиции, которые позволили бы детям подготовиться к изменившимся условиям. Основной упор был сделан на расширение компьютерных баз школ и на качество преподавания, особенно в специализированных классах с углубленным изучением отдельных предметов и иностранных языков. Нас, безусловно, радует высочайший профессиональный уровень многих фрязинских учителей. В 1995 году по итогам аттестации высшая категория была присвоена 11-ти учителям, среди них М. Б. Чжан, Л. И. Скотникова, Л. М. Волкова, А. В. Крестьянинов и другие. В то же время нельзя не отметить тот факт, что в школах по-прежнему не хватает учителей русского языка и математики. Кроме того, город испытывает острую нужду в еще одной – восьмой школе в четвертом густонаселенном микрорайоне. Надо освобождаться и от второй смены.

Что же касается компьютеризации школ, то за последние 1,5 года здесь сделан существенный задел. В школах № 1 и 7 появились современные ЭВМ в классах информатики. Недавно принято решение и о создании подобного класса в школе № 2. В течение последующих лет компьютеры установят и в других школах города.

Не без гордости отмечу, что юные фрязинцы участвуют и побеждают в школьных олимпиадах различного уровня, включая международные. Заслуга в этом опять же наших учителей. Думаем учредить для лучших школьников города ряд премий имени выдающихся наших земляков: Героя Социалистического Труда Л. А. Парышкуро, лауреата Ленинской премии А. С. Тагера, профессора В. С. Лукошкова. Не забываем мы и фрязинских выпускников, обучающихся в высших учебных заведениях, выделяя несколько стипендий для студентов отличников.

Несколько слов о перспективах на будущее. Мы по-прежнему нуждаемся в энергичных людях, энтузиастах, которые могли бы более широко охватить работу с детьми и молодежью, особенно по месту жительства. Необходимо вдохнуть новый импульс в работу наших детских клубов, спортивных учреждений. Мы бы даже пошли на организацию специальной газеты для детей и юношества. Знаю, что

фрязинцы всегда были неравнодушны к детям, и безмерно ценю в них это качество. Поэтому надеюсь на их помощь и поддержку. Примеров тому в нашей истории было немало. Вот один из них. Задумали мы в 1989 году провести конкурс на лучшее школьное сочинение и рисунок на тему «Мой город». Помочь его провести вызвалась Л. А. Парышкуро. Знаменитая и почитаемая в научном мире женщина с материнской заботой отнеслась к юным фрязинцам. Видели бы вы счастливые лица лауреатов конкурсов, принимавших призы из рук самой Ларисы Анатольевны! Поэтому я верю, что совместными усилиями Администрации и наших славных жителей мы сделаем все, чтобы детям хорошо жилось в нашем городе.

– А как бы Вы охарактеризовали то положение, в котором в целом оказался наукоград Фрязино?

– За этот небольшой период, в течение которого я работаю главой города, мне удалось разобраться в том сгустке проблем, которые поставили реформы перед бывшими советскими научными центрами. Постараюсь коротко осветить их. Прежде всего, отмечу, что высокий интеллектуальный уровень фрязинцев определяет и повышенные требования к Администрации города – и в этом я вижу основное отличие Фрязино от других городов – близлежащих наших соседей. Это касается и глубокого знания фрязинцами законодательных актов, и отстаивания своих прав на всех уровнях власти, и желания родителей иметь для своих детей образование выше среднего и т. д. В этих условиях Администрации работать, с одной стороны, сложнее, а с другой – интереснее, поскольку сами же жители подчас подсказывают нетривиальные решения городских проблем.

Другое отличие Фрязино – это происшедшее буквально за последние 3-4 года перераспределение трудовых ресурсов. Если в 1991 году на предприятиях города работало 32 тысячи фрязинцев, то к концу 1995 года осталось только 15 тысяч. Фактически половина трудоспособных жителей работает вне города. Как это сказывается на Фрязино? Прежде всего, предприятия и город в целом не досчитываются огромной суммы денежных средств, поступавших в казну города в виде налогов. А ведь эти деньги идут на нужды города, в том числе и для выплат пенсий и пособий. Получается, что многие фрязинцы помогают не своему городу, а другим, в основном Москве. Я ни в коей мере их не осуждаю – просто раскрываю специфику экономической жизни нашего города.

Перераспределение трудовых ресурсов ставит перед городскими властями и ряд других проблем. Остро стоит проблема транспорта. Электрички и автобусы в сторону Москвы в часы пик переполнены. С одной стороны – это не сфера деятельности Администрации города, а с другой – страдают наши жители и обращаются за помощью к нам. Все настойчивее раздаются голоса за продление линии движения электропоезда (электрички) на 2-3 километра в сторону густонаселенного 4-го микрорайона города Фрязино. А если начнется и застройка пятого микрорайона, над выделением земли под который (большое поле перед ТЭЦ) мы активно боремся, то, видимо, потребуется именно такое решение.

По моему твердому убеждению, решить все эти, возникшие в последние годы проблемы можно единственным путем – возродив наши основные предприятия во Фрязино. И здесь Администрация имеет большую поддержку со стороны директорского корпуса. Прежде всего, надо отметить, что в городе создан новый орган – научно-технический совет под руководством С. И. Реброва, в состав которого входят директора крупных предприятий и члены Администрации. В ближайшее время права и обязанности этого Совета директоров будут включены в Устав города Фрязино.

Совместное существование в городе государственных и иных предприятий, банков, организаций привело к совершенно иной политике управления городом. На первое место вышли экономические проблемы, причем в основном финансовые. На первых порах нам пришлось наводить порядок в методах учета работы предприятий и организаций. В нашем городе ни много ни мало действуют около 900 предприятий, и создание городского органа статистики позволило иметь обоснованный прогноз социально-экономического развития на квартал, год и т. д. Одним словом, за полтора года удалось создать алгоритм управления экономикой с учетом специфики г. Фрязино как наукограда.

– В наших беседах мы обсудили отношение Администрации города к детям, ветеранам и пенсионерам, говорили и о работе предприятий города. Последний наш вопрос касается всех жителей города. Какие изменения произошли в работе городских служб?

– Прежде чем ответить на этот злободневный вопрос, хочу напомнить фрязинцам, что наш город на две трети находится на дотации области и лишь одну треть всех финансовых расходов покрывает сам за счет сбора налогов и т. п. Что это означает? А то, что большую часть своего рабочего времени я, как Глава города, нахожусь не в своем кабинете и, к сожалению, не в городе, а в областных структурах. Мы должны ясно понимать, что дотации сами по себе не приходят, даже если по ним и есть решение на всех уровнях. Их тоже необходимо выбивать, с кого-то требовать, у кого-то просить. Поэтому глава города больше работает на перспективу, а вот заместители, надо отдать им должное, тащат в городе основной воз. Но такая уж специфика нашего города с предприятиями ВПК – существенно зависит от области.

Переходя к анализу работы коммунального хозяйства, отмечу, что самый, пожалуй, важный итог деятельности Администрации заключается в том, что мы пережили ряд зим без великих потрясений. Были тепло, вода, газ, свет. А ведь за короткой фразой «пережили зиму» стоит огромный ежедневный труд. Я благодарен сотрудникам городских организаций и промышленных предприятий за их добросовестную, порой самоотверженную работу по поддержке системы жизнеобеспечения города.

Описывая ситуацию в общем, хочу отметить, что наши трудности заключаются еще и в том, что в городе заново создается коммунальное хозяйство. Практически вся производственная база осталась на предприятиях, наши же городские мастерские изрядно поизносились. Мы переламаываем и ситуацию, связанную со строительством и распределением жилья. Для примера: НИИ «Платан» продал часть дома на Барских прудах. Когда я ознакомился, кто купил эти квартиры, то ужаснулся. Администрация города, видя такую ситуацию, взяла под свой контроль распределение и продажу жилья. Мы сами будем определять – кому продать, а кому нет. В противном случае очень скоро Фрязино потеряет свой неповторимый характер. Продолжая тему строительства, мне особенно приятно отметить, что в городе заложен первый муниципальный дом. Будем по мере сил и возможностей ускорять его строительство.

Важное значение для нас приобрело также объединение по имуществу и жилью (КВИЖВ). Мы единственные в области пошли на такое объединение и в какой-то мере даже опередили правовую базу. Сейчас, правда, после того как мы наработали опыт, юристы согласились с правомерностью нашего нововведения. Предыдущие власти, рьяно исполняя приказы А. Б. Чубайса, раздали под приватизацию все муниципальные объекты. Этими действиями они временно смогли заткнуть прорехи в бюджете и поэтому сегодня вспоминаются как благотворители. В целом же результат оказался плачевным – город потерял практически всю собственность. Знаю, что особенно рьяные «приватизаторы» замахивались даже на ГНПП «Исток», но получили достойный отпор от руководителей предприятия, в том числе от главного инженера «Истока» В. Н. Батыгина. В заключение отмечу, что город – это не просто перечисление служб, это большая взаимозависимая система, подобная в некотором роде человеческому организму, поэтому нельзя не учитывать элемент комплексности и взаимосвязки. Очень важную роль играет психологический фактор. Я категорически против деления жителей на «промышленников» и «городских», на «коммунальщиков» и «работников бюджетной сферы». Только в нашем единении, в понимании всей ситуации – наш более быстрый путь выхода их экономического кризиса.

ВАЛЕНТИН АЛЕКСЕЕВИЧ МАЛЬЦЕВ

О научно-производственном комплексе 17 (НПК-17), его славной истории и сотрудниках написано немало. И все же вновь и вновь, знакомясь с работой и людьми этого одного из старейших подразделений нашего предприятия, удивляешься, насколько знаменательны и важны их дела.

Валентин Алексеевич Мальцев возглавлял НПК-17 более 20 лет в самый непростой период деятельности НПП «Исток». После его ухода на заслуженный отдых, скорпостижно ушел из жизни его приемник, талантливый ученый Виталий Юрьевич Мякинков. Этой тяжелой утрате мы посвятили в научно-техническом сборнике «СВЧ-техника» выпуск 1 за 2019 год. В настоящее время легендарным коллективом руководит Евгений Валентинович Терешкин, уже сумевший сделать немало, в том числе объединить крупные подразделения «Истока»: НПК-17 и НПК-25.

Настоящее интервью В. А. Мальцев дал нам 15 лет назад. Недавно Валентину Алексеевичу исполнилось 75 лет.

– Как Вы сами стали сотрудником НПК-17?

– *Произошло всё очень просто. В 1968 году я пришёл на работу в отделение 17. Привёл меня в отделение мой отец, который был хорошим другом начальника отделения, ветерана Великой Отечественной войны, лауреата Ленинской премии Ивана Ивановича Бродуленко и его заместителя Михаила Фёдоровича Филькина. Уже в коридоре, на стенах которого были вывешены фотографии лучших сотрудников отделения и многочисленные награды ведущего подразделения «Истока», я понял, что попал в коллектив необычный, со сложившимися традициями и, честно говоря, по-юношески сразу влюбился в него. М. Ф. Филькин завёл меня в одну из лабораторий и громко, чтобы все слышали, позвал её руководителя, Анатолия Израйлевича Иткина: «Иткин, подойди сюда, пожалуйста». Из-за стола, нехотя и с несколько недовольным видом, что его оторвали от интересной работы, поднялся невысокий мужчина. «Толик, этот молодой специалист будет работать у тебя», – сказал М. Ф. Филькин, развернулся и ушёл. Так началась моя трудовая деятельность.*

Через несколько дней я уже ощущал всё величие подразделения. Атмосфера в нём мне представилась такой. С одной стороны, строжайшая дисциплина в плане выполнения работ, да не просто работ, а работ уникальнейших. Здесь не давалось поблажек никому. С другой стороны, совершенно очевидное присутствие уважительного человеческого фактора, неподдельного внимания каждого к каждому вне зависимости от должности и звания. Другого такого дружного коллектива, по-моему, не было на нашем предприятии. Сейчас в НПК-17 приходит молодежь, молодежь очень хорошая, но она уже не такая, какими были мы. Она не пропиталась теми богатыми традициями, в которых, в буквальном смысле слова, «варились» мы.

– Вы отметили дружный коллектив отделения, хотя, как известно, в нём работали специалисты двух полярных школ...

– *Уникальность НПК-17, на мой взгляд, основывается в том числе на двух совершенно примечательных моментах. Во-первых, подразделение формировалось и пополнялось новыми кадрами по своеобразному принципу. Попасть в него могли только те люди, родственники которых работали в нашем отделении или в других подразделениях «Истока». При этом нового сотрудника обязательно кто-то должен был*



В. А. Мальцев

«привести за руку» и поручиться за него. Случайные люди к нам не попадали, а если и попадали, то долго в коллективе не задерживались. В результате в НПК-17 сформировались целые династии «отцов, матерей и детей», что, несомненно, играло большую роль в воспитании молодёжи и сплочении коллектива. Мы были объединены до такой степени, что зачастую границы между лабораториями научной части отделения и его производственной частью просто стирались.

Другая причина крепости коллектива как раз и состояла в том, что в НПК-17 не только существовали, но и плодотворно работали специалисты двух полярных школ. Ни в одном другом подразделении предприятия одновременно не трудились два таких разных во всех отношениях человека и крупнейших специалиста, как Лариса Анатольевна Парышкуро и Михаил Борисович Голант. Оба были светилами отечественной электроники. Оба имели государственные награды и звания. Соперничество двух великих «маэстро» не было непримиримой борьбой, это была плодотворная, открытая конкуренция, которая приносила только благодатные плоды.

Доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской и Государственной премии СССР Михаил Борисович Голант был человеком высокоинтеллигентным, мягким, даже где-то слишком мягким. Обладал энциклопедическими знаниями. Всегда был готов всем и всё объяснить. Если не понял, объяснит ещё десять раз. При этом на его лице, как бы Вы не старались, никогда бы не заметили и тени раздражения. Он был человеком слова и на ветер слов не бросал. Михаил Борисович умел всегда взвешивать не только свои мысли, но и высказывания. С другой стороны, М. Б. Голант по-своему, даже как-то болезненно, воспринимал понятия «жёстких» сроков выполнения НИР и ОКР, достижения высокой рентабельности своих работ, необходимости «любой ценой» получить результат. Будучи человеком, практически неподверженным каким-то эмоциональным воздействиям, Михаил Борисович привлекал к себе сотрудников своим пытливым умом, научной организованностью. Кто хотел защитить кандидатскую диссертацию, естественно, был с ним. Его идеи не всегда было легко реализовать на практике, и другая «школа», о которой пойдет речь ниже, не упускала случая высказаться по этому поводу.

Герой Социалистического Труда Лариса Анатольевна Парышкуро, напротив, была человеком эмоциональным и весьма энергичным. Своим энтузиазмом, если хотите, умела заразить за пять минут, особо бестолковых – за десять. Поставленной цели специалисты её школы добивались, проходя, казалось, через непроходимые преграды. Личный пример этой выдающейся женщины буквально завораживал. Работая под её началом, с первых минут начинаешь понимать, что срок завершения работы – это параметр прибора такой же, как сто других, оговорённых в ТЗ. Она глубоко вникала в любую проблему, работала без устали и требовала такого же отношения к делу от своих подчинённых. В результате на свет появлялись уникальные приборы с высокими параметрами, причём в строго установленные сроки и не мгновением позже! Высочайшая ответственность за порученное дело, научная интуиция, умение организовать и увлечь за собой коллектив – вот те три кита, на которых стоял её замечательный талант организатора. Таких людей, как Лариса Анатольевна, я нигде и никогда больше не встречал!

Нас, молодых специалистов, конкуренция этих двух школ не то чтобы увлекала, она поглотила полностью. Из неё мы черпали знания, опыт, примеры беспощадной, прежде всего к себе, борьбы за параметры приборов и многое другое, что нам пригодилось впоследствии. Мне с первых дней работы в отделении 17 посчастливилось оказаться в отделе, возглавляемом Л. А. Парышкуро, я очень многим обязан её школе, многому научился у Ларисы Анатольевны и беспредельно ей за это благодарен.

В конце 70-х годов перед нашим предприятием была поставлена сложнейшая научно-техническая проблема – создать изделия С-10 и С-20. Генеральный директор «Истока» Сергей Иванович Ребров сумел увлечь решением этой проблемы очень многих, в том числе и Л. А. Парышкуро. В нашем отделе образовался коллектив, разрабатывающий блок задающих генераторов (БЗГ) для «двадцатки».

Надо признаться, что некоторые специалисты НПК-17 в целом прохладно отнеслись ко всей работе по С-20, открыто заявляя на НТС, что это не дело нашего предприятия, что такие задачи должны решать радисты. Думаю, что и в других подразделениях «Истока» подобные высказывания были тоже. Тогда Сергей Иванович пошёл по оригинальному пути. Он предложил выполнить поставленную сложнейшую задачу силами только молодых, конечно, под руководством специалистов, имеющих опыт работы. В отделе 17 был создан молодёжный коллектив, руководить которым было поручено все же Л. А. Парышкуро. Ставка на молодёжь – очень мудрый ход дирекции, поскольку, как показало дальнейшее развитие событий, только молодым было по силам работать с невиданным энтузиазмом, иногда непрерывно по 48 часов, спать на стульях, питаться бутербродами, которые приносили из дома наши жёны и близкие. Заставлять кого-либо работать в таком режиме не было необходимости. Напротив, заставляли идти домой отдохнуть. Забегая вперёд, скажу, что сегодня, оглядываясь назад, все мы, участники тех прекрасных событий, вспоминаем эту работу с великой радостью и чувством, что и ты был, пусть совсем немного, но всё-таки причастен к этому важному делу. Сейчас все эти, прожитые тогда часы, дни, месяцы видятся мне лучшими в моей жизни.

При обсуждении результатов спорили на равных, да так, что порой забывали, что перед тобой генеральный директор. Сергей Иванович сам часами не выходил из наших лабораторий, сидел на полусломанных стульях за установками, угощался бутербродами, крутил ручки анализаторов спектра и осциллографов, и не раз можно было видеть, как какой-нибудь Саша или Валя в пылу научного азарта «оттирают» его от этих самых ручек. Общая глобальная задача сплотила всех: руководителей, инженеров, рабочих. В истории предприятия эти годы работы были явлением, возможно, пока до конца не понятным и не раскрытым.

К середине 80-х годов работы по С-10 и С-20 были с успехом закончены, Лариса Анатольевна сначала ушла с руководящих постов, а позднее и совсем из подразделения – на заслуженный отдых.

– Несколько лет НПК-17 руководил Анатолий Гаврилович Михальченков.

– Да, это так. Анатолий Гаврилович был назначен начальником НПК-17 в самое трудное для нашего коллектива время. Думаю, что лучшей кандидатуры и желать было трудно. Он прекрасно владел не только производственными сторонами бесконечно возникающих вопросов, но и умел найти общий язык со всеми, вовремя погасить конфликты, где надо – был суровым, а где-то – добрым и по-отечески заботливым. Руководителем нашего коллектива был поставлен человек, являвшийся крупным общественным деятелем, секретарём партийного комитета «Истока», учёным с опытом научной работы, человек, умеющий ладить с людьми, а важность этого качества для начальника невозможно переоценить.

Известно, что Анатолий Гаврилович умеет быстро принимать решения и безукоснительно, в положенные сроки их выполнять. В то время, время работы над БЗГ, который, по существу, являлся сердцем С-20, это было чрезвычайно важно. Обладая уникальными качествами владения собой, Анатолий Гаврилович никогда не позволял себе необоснованных эмоций. Несмотря на продолжительную общественную работу, А. Г. Михальченков оставался учёным, кандидатом технических наук. Он прекрасно разбирался во всех тонкостях решаемой задачи. А поскольку, как секретарю парткома, ему приходилось часто общаться с генеральным директором, в том числе и по производственным вопросам, то по некоторым позициям, особенно касающимся общих подходов, он был явно подготовлен лучше любого другого из возможных кандидатов на эту должность.

– Ваше подразделение всегда на хорошем счету в НПО «Исток». Но как можно ещё более повысить эффективность работы НПК-17?

– Повышать эффективность работы НПК-17, конечно, можно. Главная наша боль и радость одновременно состоит в том, что мы заняты в самой эффективной программе работ, проводимых

сегодня в «Истоке», – это работы, связанные с изделием 50Э. В этой программе нам поручено заниматься разработкой и выпуском БЗГ. Разработка БЗГ – это создание совершенно нового блока генераторов. Назначение его осталось прежним, а вот конструкция и целый ряд параметров изделия, включая его надёжность, совершенно иные. Это изделие создано в НПК-17 уже в последние годы в рамках программы, руководителем которой был генеральный директор «Истока» Александр Николаевич Королёв. Блок задающих генераторов, хотя и чрезвычайно сложное изделие, но и весьма технологичное, здесь огромная заслуга главного конструктора БЗГ начальника лаборатории Гусева Анатолия Петровича и начальника лаборатории Чугуй Александра Петровича, а также многих их сотрудников, работающих над этой проблемой. Хорошая технологичность БЗГ позволила организовать ритмичный его выпуск в цехе 27, которым много лет руководили Александр Васильевич Тыртышников, Евгений Валентинович Терешкин и Владимир Иванович Дубинин. А если вспомнить, что цена этого изделия высока, то и получается, что НПК-17 всегда имел хорошее превышение доходов над расходами. Мы по своему статусу научно-производственный комплекс и просто (в силу научного обязательства) не должны «зацикливаться» на одном изделии и на его выпуске. Количество одновременно разрабатываемых приборов в НПК, конечно, никто не оговаривал, но финансовые поступления в кассу института от проведения этих работ должны быть хотя бы соизмеримы с доходами, получаемыми от выпуска уже разработанных и серийно выпускаемых приборов. Вот вам и резерв повышения эффективности работ, выполняемых в НПК-17. Сама разработка БЗГ требовала подключения практически всего научного потенциала НПК, специалистов всех научных направлений, записанных за НПК. Чтобы Вы не подумали, что в НПК-17 больше ничем, кроме разработок и поставок БЗГ, не занимаются, сообщу, что, помимо названных работ, в НПК проводятся работы по четырём контрактам, одиннадцати ОКР, трём поставочным работам. При этом план постоянно корректируется в сторону увеличения числа работ и получаемых за их выполнение средств.

Я достаточно подробно рассказал о НПК-17 и его истории. За многие годы в отделе 170, отделении 17, сегодня НПК-17, были созданы более 500 типов приборов СВЧ для самых различных видов радиоэлектронной аппаратуры, как гражданского, так и военного применения. Подавляющее число приборов было внедрено на серийные заводы страны. Возглавляют научно-технические и производственные направления НПК-17 прекрасные люди. Имена наших выдающихся учёных, инженеров, технологов, измерителей, техников, рабочих хорошо известны не только в СССР и России, но и далеко за её пределами. Двум нашим светилам я посвятил большую часть своего интервью. Продолжу свое повествование о других руководителях.

Гусев Анатолий Петрович и Чугуй Александр Петрович. Об их огромной роли в обеспечении разработки и выпуска новых БЗГ я говорил выше.

Лебедев Всеволод Николаевич. Человек, который посвятил всю свою сознательную жизнь созданию стабильных СВЧ-генераторов. Лауреат Государственной премии СССР. Человек, давший путёвку в жизнь ни одному десятку некогда юных, теперь не очень юных, талантов.

Негирев Александр Андреевич. Создание приборов самых коротких длин волн в мире – дело его кропотливого труда. Достигнутые результаты по праву занимают заметное место в «золотом фонде предприятия».

Мякинков Виталий Юрьевич. Научно-техническое направление, им возглавляемое, одно из самых интереснейших и сложных одновременно.

Рудый Юрий Борисович. Человек постоянно «заряженный» новыми идеями.

Мне выпала высокая честь трудиться с ними рядом, учиться у них. Отмечу еще целый ряд специалистов высочайшего уровня: Тоцов Анатолий Васильевич, Савельева Людмила Геннадьевна, Васильев Леонид Андреевич, Иванов Владимир Васильевич, Мордовичева Галина Александровна, Мурашова Надежда Алексеевна, Якунин Михаил Николаевич, Царев Владимир Павлович, Сергиенко Ирина Арсентьевна,

Русакова Антонина Константиновна, Кузнецова Раиса Александровна, Клейман Григорий Семенович, Хламкина Татьяна Васильевна и многие, многие другие. А будущее, как известно, за молодежью. Поэтому НПК-17 планомерно пополняется новыми кадрами. С особым вниманием относимся мы к студентам «истоковского» филиала МИРЭА.

Что значит НПК-17 для отечественной науки и техники, для России, для города Фрязино, для многих сотрудников, работающих на предприятии сегодня, да и для тех, кто когда-то здесь трудился? Если я скажу: «Значит всё», – то не очень сильно ошибусь.

НПК-17 прошёл через судьбы не одного поколения фрязинцев. И как бы эти судьбы не сложились, перед величием НПК-17 каждый снимет шляпу.

АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ КАЛЬФА

22 марта 2020 г. ушел из жизни А. А. Кальфа.

Из некролога: «С уходом Александра Алексеевича Кальфы жители Фрязино лишились по меньшей мере десяти высококлассных специалистов в разных областях человеческой деятельности. Не стало ведущего научного сотрудника отделения 10 и начальника лаборатории НПК-4 «Истока», на котором он проработал более 35 лет. Не стало выдающегося ученого, доктора физико-математических наук, чье имя украшало статьи в различных научных журналах страны. Не стало изобретателя СССР, который генерировал революционные идеи в области электроники СВЧ. Не стало уникального сотрудника лаборатории профессора Александра Семеновича Тагера, к которому уважаемый ученый испытывал нескрываемую симпатию. Не стало одаренного преподавателя учебных институтов Москвы и Московской области. Не стало неутомимого пропагандиста глубоких научных и общественных направлений развития отечества. Не стало уникального писателя, поэта и журналиста с глубоким пониманием жизни, автора пусть не многочисленных, но удивительных по красоте языка и смелых по содержанию литературных произведений. Не стало многолетнего члена совета молодых ученых и специалистов «Истока», активного организатора знаменитых вечеров для молодежи г. Фрязино в 70-е годы прошлого столетия».



А. А. Кальфа

Кальфа А. А. родился 15 мая 1946 г. в городе Евпатория в семье медиков. Его отец, по национальности караим, известный в Крыму детский врач, в конце жизни – главный педиатр г. Евпатория, Мать, еврейка, во время оккупации гитлеровцами Крыма около двух лет скрывалась от них в подвале собственного дома.

Александр, в отличие от своего брата, видного медицинского деятеля Крыма, не пошел по стопам родителей. Он поступил на физический факультет Уральского государственного университета в городе Свердловске, после окончания которого в 1969 г. был распределен на «Исток». Сюда же приехала и его жена – выпускница философского факультета того же университета Татьяна Демьяненко, сестра легендарного актера Александра Демьяненко – киноперсонажа «Шурика».

Свою трудовую деятельность на «Истоке» А. А. Кальфа начал в отделении 25, в лаборатории доктора технических наук А. В. Жукова. Лаборатория под патронажем академика Н. Д. Девяткова

занималась разработкой отечественных тепловизоров. Под редакцией выдающегося ученого были изданы две брошюры, автором которых был молодой ученый А. А. Кальфа, который в силу своего литературного таланта написал часть этих уникальных научных брошюр.

Несмотря на перспективность этого направления, Александра Алексеевича все же больше привлекала теория полупроводниковых приборов. Под руководством главного научного сотрудника ИРЭ АН СССР Ш. Когана он подготовил кандидатскую диссертацию, которую успешно защитил в 1980 г. в Молдавском государственном университете в г. Кишиневе. А немного ранее при содействии уже к тому времени лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора А. С. Тагера он перешел работать в теоретический отдел. В лаборатории Александра Семеновича Тагера в начале 80-х годов в полной мере раскрылся и научный талант А. А. Кальфы.

Необходимо отметить, что в лаборатории А. С. Тагера наряду с теорией лавинно-пролетных диодов (ЛПД), которую продолжали развивать Е. И. Голант, Э. В. Погорелова и Я. Б. Мартынов, начались комплексные работы по теории и проектированию инжекционно-пролетных диодов (В. Б. Сулимов, А. А. Попадьян), СВЧ-диодов (Н. А. Гусельников, О. Т. Козловцева, И. В. Беляева), диодов Ганна (А. А. Кальфа, С. Б. Пореш, А. В. Гарматин), полевых транзисторов с барьером Шоттки (А. А. Кальфа, А. Б. Пашковский, Я. Б. Мартынов, Е. В. Бувайлик), а также устройств на основе диодов и транзисторов СВЧ (А. К. Балыко, Б. А. Головкин, С. И. Варгузов, С. М. Овечкин, Л. В. Манченко, В. В. Синицын, В. В. Малов, Н. И. Юсупова, С. Н. Коноплянников, С. А. Хозяинов, Н. А. Брагина, Т. Б. Голубева, А. В. Климова, М. Ю. Виноградова).

В это судьбоносное время Александром Алексеевичем Кальфой впервые в нашей стране были разработаны уникальные методы расчета взаимодействия электромагнитных полей СВЧ с электронно-дырочной плазмой в кристаллах на частотах, сравнимых с характерными частотами плазмы. Позднее в развитии этих методов А. А. Кальфой и А. Б. Пашковским были созданы оригинальные квазидвумерные модели, широко применяемые для расчета динамических и стохастических процессов в полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ), а также проведены исследования в широком диапазоне частот (до 100...200 ГГц) динамических и шумовых характеристик ПТШ, в том числе транзисторов с субмикронными толщинами слоев и субмикронной длиной затвора.

В 80-е годы значительная часть теоретических исследований в мире была направлена на перспективные гетероструктурные полупроводниковые приборы, выполненные из нескольких полупроводниковых материалов (позднее академик АН СССР Ж. И. Алферов за работы в этой области был удостоен Нобелевской премии). Развитие этого направления применительно к технике СВЧ привело к идее создания полевого транзистора на гетероструктуре с селективным легированием (ГСЛ), который впервые был предложен и подтвержден авторским свидетельством (1980 г.) А. А. Кальфой и А. С. Тагером, правда, практически одновременно и независимо от них патентами ученых Японии и США.

Это изобретение и последующий за ним цикл первоклассных научных работ послужили основой для написания докторской диссертации Александра Алексеевича, которую он успешно защитил в 1997 году в научном совете Института физических проблем (г. Москва).

Привлекательное качество А. А. Кальфы заключалось в том, что свои теоретические исследования он всегда стремился воплотить в конкретные разработки «Истока». С этой целью в 1993 году он перешел в НПК-4, где руководимая им лаборатория впервые в нашей стране создала ГСЛ и на их основе новые типы полевых транзисторов. К сожалению, по семейным обстоятельствам Александр Алексеевич вынужден был оставить эти работы на «Истоке» и переехать в Москву,

где он сначала продолжил свои исследования в научных предприятиях столицы, а затем перешел на преподавательскую работу в учебные институты Москвы и Московской области.

Научный интерес к новому и неизведанному не покидал А. А. Кальфу всю жизнь. Он опубликовал более 180 статей в научных журналах, 22 научно-технических отчета. Он автор 15 изобретений СССР и патентов России.

Александр Алексеевич обладал редким для крупного ученого талантом: он всегда с восхищением рассказывал о новых научных результатах своих коллег. Другое привлекательное его качество – доступно объяснять новые идеи всем, даже непосвященным, что, в частности, всегда восхищало профессора А. С. Тагера. Лекции его были настолько увлекательными, что учащиеся старались не пропускать ни одного занятия. Еще одна черта, достойная его глубокого уважения, – это отзывчивость, исходившая от самого сердца. Он любил людей и поэтому всегда стремился помочь любому человеку, который обращался к нему за помощью: студенту, молодому специалисту, опытному сотруднику, начальнику отдела или заместителю генерального директора.

Память о нем навсегда останется в наших сердцах. Мы искренне любили Александра Алексеевича.

БОРИС МИХАЙЛОВИЧ ГИЛЬМАН

В истории градообразующего предприятия «Исток» и города Фрязино 1980 год стал критическим. В связи с предстоящими Олимпийскими играми в Москве, на протяжении нескольких лет практически все строительство в городе было заморожено из-за нехватки средств. Был сорван пятилетний план по жилищному строительству.

В отчаянии 1500 сотрудников «Истока» подписались под письмом в ЦК КПСС о бедственном положении с жильем. Письмо было рассмотрено в высших инстанциях страны. Генеральный директор «Истока» С. И. Ребров и секретарь парткома А. Г. Михальченков получили выговоры по партийной линии. Дело усугублялось еще и тем, что тогдашний заместитель генерального директора «Истока» по капитальному строительству в связи с открытым по нему персональным делом был вынужден срочно оставить свою должность.

В этой критической ситуации С. И. Ребров принял, как потом оказалось, судьбоносное для предприятия и города решение – пригласил возглавить капитальное строительство 40-летнего жителя города Реутов Б. М. Гильмана.

«Борис Михайлович – выпускник одного из лучших строительных вузов страны, высококлассный профессионал, два десятилетия проработавший на стройках и в проектных организациях Москвы и Московской области, человек, глубоко разбирающийся во всех деталях строительства производственных и жилищных объектов», – так представил коллективу своего заместителя генеральный директор.

Но было и еще что-то такое, о чем он не сказал, но что замечал каждый, кто общался с Б. М. Гильманом. Когда Борис Михайлович говорил о строительстве, его глаза начинали светиться, выдавая тем самым глубокое и искреннее неравнодушие его к своему любимому делу. Своими



Б. М. Гильман

планами новыхстроек он заражал окружающих, и все начинали верить, что действительно скоро все изменится к лучшему, у людей появится жилье, будут достроены социальные объекты и построены новые производственные помещения.

С приходом в город Б. М. Гильмана в короткие сроки был построен и сдан в эксплуатацию 60-квартирный дом по ул. Советской. Рядом стали возводить кооператив, началось масштабное по тем временам строительство молодежного жилищного комплекса (МЖК), возобновились строительные работы на хирургическом корпусе Центральной городской больницы, началось строительство многоэтажной детской поликлиники, в центре города были снесены двухэтажные бараки с туалетами на улице и на их месте высокими темпами стало возводиться новое помещение для средней школы № 1 с плавательным бассейном. Большой фронт строительных работ развернулся по другую сторону проспекта Мира, а еще более точнее – по другую сторону глубокого оврага, разрезающего город. Активно стал осваиваться земельный участок в районе улиц 60 лет СССР и Полевой. Мощный импульс получило кооперативное строительство. Во Фрязине один за другим стали появляться упирающиеся в небо высотки. Входили в строй и заселялись дома 23, 25а, 25 по ул. Полевой. В 1988 г. при активном участии Б. М. Гильмана была разработана «Программа жилищного строительства и улучшения жилищных условий сотрудников «Истока» до 2000 года».

Начало 90-х годов коренным образом изменило все эти планы. Рушилось все. Один за другим переставали работать даже флагманы отечественной промышленности. К великому счастью и во многом благодаря генеральному директору «Истока» А. Н. Королеву, предприятие уцелело, хотя численность его сотрудников уменьшилась втрое. К чести Бориса Михайловича, ему удалось все же довести до завершения некоторые недостроенные жилые дома, в том числе и строительство экспериментального жилищного комплекса (ЭЖК). В целом же, когда строительство не только в городе, но и во всей стране остановилось, должность заместителя генерального директора по строительству стала для «Истока» просто ненужной. Однако, даже в этот труднейший период, Борис Михайлович продолжал верить в свое правое дело и убеждал, что во все века и при всех правителях строительство было, есть и обязательно будет!

Глава города Фрязино не позволил Б. М. Гильману покинуть наш город и предложил ему должность своего заместителя по строительству. С большими трудностями было завершено строительство молочной кухни и детского комбината в 4-м микрорайоне, утвержден проект строительства новой школы № 8 в этом же районе и даже частично возведен под нее фундамент.

Только к 1999 году ситуация стала изменяться к лучшему. Эта положительная динамика продолжилась и в последующие годы. В городе вновь возобновилось жилищное строительство. Однако многомиллионные поступления в городскую казну и крупные инвесторы привлекли внимание к Фрязину «новых предпринимателей», некоторые из которых приняли участие в выборах главы города в 2000 г. В результате нарушений законодательства по выборам возникли многочисленные упреки и претензии между Администрацией города и городским Советом. К их разбирательству были привлечены Щелковская прокуратура и Щелковский городской суд, и в результате выборы главы города и городского Совета 14 мая 2000 г. были признаны нелегитимными. В городе возник коллапс власти. В какой-то момент городом управляли сразу четыре руководителя. В этой сложнейшей, где-то даже полукриминальной, ситуации возвращенный судом легитимный глава города передал всю полноту власти одному из своих пяти заместителей – и этим человеком стал именно Борис Михайлович Гильман, который в течение полугода до новых выборов исполнял обязанности главы города Фрязино.

Широта и глубина познаний в различных областях человеческой деятельности, высокая интеллигентность и доброжелательность, уважительное отношение к нему фрязинцев позволили Б. М. Гильману выполнить исключительно важную миссию, которая, возможно, и была посильна только ему – вывести наукоград из политического коллапса, возродить исчезнувшее уважение к городской власти, организовать и провести выборы главы города и городского Совета, придать новый импульс городским трудовым коллективам в деятельности на благо жителей наукограда. Это был настоящий гражданский подвиг Бориса Михайловича перед жителями Фрязино.

В начале столетия (тысячелетия) строительная индустрия стала развиваться стремительными темпами. В город пришли инвесторы, которые за возможность строительства жилых домов брались возводить городские объекты социального назначения. Новый глава города назначил Б. М. Гильмана своим заместителем по градостроительству. Совместными усилиями они поставили и решили одну из важнейших задач – с лица города убрали разделяющий город глубокий овраг и на его месте возвели автобусную станцию и большой торговый центр, по существу, первый в городе супермаркет. Рядом с «Олимпом» вырос современный спортивный центр с 50-метровым бассейном. Темпы жилищного строительства в городе набрали небывалый размах. Никогда и никто одновременно не создавал в городе такого количества строительных объектов.

Пятнадцать лет Борис Михайлович отдал «Истоку» и еще пятнадцать – г. Фрязино, который за этот период превратился из города в наукоград. В общей сложности с участием Б. М. Гильмана в городе было построено около 50 объектов, примерно половина из них – жилые дома для фрязинцев.

Борис Михайлович обладал уникальным даром улаживать конфликтные ситуации, которые в строительстве стоят наиболее остро. В последние годы жизни, на пенсии, Борис Михайлович писал стихи, искренние, душевные...

4 ноября 2019 г. Б. М. Гильман ушел из жизни. Основной вклад Б. М. Гильмана в развитие города Фрязино состоит в придании наукограду внешнего облика, соответствующего его статусу, и в отстаивании величия города в переломный момент существования страны. Вечную память о себе выдающийся «истоковец» и фрязинец оставил в построенных им многочисленных городских объектах.

Статья поступила 17 января 2023 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 публикации (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 фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDRAW;
- 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 Р 7.0.100–2018 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 2023 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

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 оформить заказ, произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», отдел сбыта; тел.: 8(495)465-88-67. Отчетные документы высылаются с каждым номером сборника.

ЗАКАЗ

Прошу принять заказ на подписку научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2023 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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 23.6.2023 г.
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.
г. Фрязино

Усл. п. л. 13,5
Уч.-изд. л. 14,0
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
9 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: stebunov@istokmw.ru; info@istokmw.ru



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2023, вып. 2(558), с. 1-110

Подписной индекс 36292

