



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (557)

2023

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(557)

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 1(557)

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.* – Микромодуляция радиосигналов и/или параметров узлов как способ оптимизации характеристик и конструкции СВЧ радиоэлектронных устройств..... 6

Электроракуумные приборы

- Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.М., Арион О.А., Комраков П.А., Соляников А.В.* – Режимы включения/выключения ЭОС с кольцевым катодом в ЛБВ с низковольтным управлением..... 16

- Моисеев Д.С., Юнаков А.Н., Евсеев С.В.* – Исследование многотрубного многозакорного резонатора для мощного двухтрубного многолучевого клистрона С-диапазона с увеличенной в 2 раза полосой рабочих частот..... 25

- Калачев А.Д., Царев В.А.* – Широкополосный малогабаритный многолучевой клистрон Ки-диапазона..... 34

Твердотельная электроника

- Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Фёдоров Н.А., Медянцева Е.В.* – Модернизация конструкции гибридной интегральной схемы ГУН СВЧ-диапазона..... 46

Технология и материаловедение

- Анисимов А.Г., Безлепкин В.А., Мали В.И., Михлин Ю.Л., Токарева Е.Ю., Немущенко Д.А.* – Электрофизические характеристики высокоплотной корундовой керамики, спеченной в условиях SPS..... 52

Медицинская электроника

- Казаринов К.Д., Полников И.Г.* – 50 лет созданию нового направления – биомедицинской радиоэлектроники. Академик Н. Д. Девятков..... 58

История

- Алексеев З.Т.* – Михаил Борисович Голант (к 100-летию со дня рождения)..... 68

CONTENTS

Radioelectronic devices

- Peregonov S.A.* – Micromodulation of radio signals and/or parameters of nodes as a way to optimize characteristics and design of microwave radio electronic devices..... 6

Electrovacuum devices

- Filin Yu. Yu., Morev S.P., Kolomiytseva N.M., Arion O.A., Komrakov P.A., Solyanikov A.V.* – On/off modes of EOS with an annual cathode in a TWT with a low-voltage control..... 16

- Moiseev D.S., Yunakov A.N., Evseev S.V.* – Investigation of a multi-tube multi-gap resonator for a high-power two-tube multiple-beam C-band klystron with a double increased operating frequency band..... 25

- Kalachev A.D., Tsarev V.A.* – A Ku-band broad-band miniature multiple-beam klystron..... 34

Solid-state electronics

- Goryunov I.V., Iovdalskiy V.A., Fedorov N.A., Medyankova E.V.* – Improving a microwave VCO hybrid integrated circuit design..... 46

Technology and material science

- Anisimov A.G., Bezlepkin V.A., Mali V.I., Mikhlin Yu.L., Tokareva E. Yu., Nemuschenko D.A.* – Electrophysical characteristics of high-density corundum ceramics sintered under SPS conditions.... 52

Medical electronics

- Kazarinov K.D., Polnikov I.G.* – 50 years of the creation of a new direction – biomedical radioelectronics. Academician N. D. Devyatkov..... 58

History

- Alexeenko Z.T.* – Mikhail Borisovich Golant (to the 100-th anniversary of the birth)..... 68

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.376:621.385.6

МИКРОМОДУЛЯЦИЯ РАДИОСИГНАЛОВ И/ЛИ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК И КОНСТРУКЦИИ СВЧ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

С. А. Перегонов

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

Периодическое малое изменение параметров сигнала или элемента схемы позволяет выявить направление изменения выходных параметров контролируемого узла и выработать управляющий сигнал, обеспечивающий получение оптимального параметра.

КС: модуляция сигналов, модуляция параметров, поднесущие частоты

MICROMODULATION OF RADIO SIGNALS AND/OR PARAMETERS OF NODES AS A WAY TO OPTIMIZE CHARACTERISTICS AND DESIGN OF MICROWAVE RADIO ELECTRONIC DEVICES

S. A. Peregonov

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

A periodic small change in the parameters of a signal or a circuit element makes it possible to identify the direction of change in the output parameters of the controlled node and develop a monitoring signal that provides the optimal parameter.

Keywords: signal modulation, parameter modulation, frequency subcarriers

Под микромодуляцией параметров сигналов в данном случае понимается принудительное изменение частоты, амплитуды или фазы сигнала или параметров узла примерно от 0,01 до 0,001 от номинала. В узлах аппаратуры микромодуляции могут подвергаться такие параметры, как усиление, выходная мощность, коэффициент отражения сигналов по величине или фазе и др. По своей сути, предлагаемая методика является частным случаем реализации систем авторегулирования.

Смысл работы предлагаемой системы заключается в том, что принудительная модуляция параметра позволяет выделить фазу сигнала огибающей основного контролируемого сигнала на выходе «дискриминатора» устройства оптимизации и, в зависимости от знака отклонения (+ или -) от требуемого номинала, использовать его для уменьшения отклонения за счёт обратной связи до допустимого значения. При этом система может работать в штатном режиме функционирования устройства. Более того, применяемые вспомогательные элементы системы модуляции могут быть важной составной частью самой аппаратуры.

Система оптимизации включает в свой состав: 1) генератор модулирующей (поднесущей) частоты; 2) дискриминатор контролируемого параметра (например, опорный резонатор при стабилизации частоты, сумматор сигналов при оптимизации согласования узлов, опорное напряжение при стабилизации уровня мощности и др.); 3) детектор сигнала контролируемого параметра; 4) усилитель сигнала детектора; 5) фазовый детектор (ФД); 6) полосовой фильтр, определяющий полосу и скорость реакции системы оптимизации.

Все перечисленные узлы, за исключением дискриминатора, работают на низких радиочастотах.

Рассмотрим работу системы оптимизации на примере стабилизации частоты СВЧ-генератора с электронной перестройкой частоты (рис. 1).

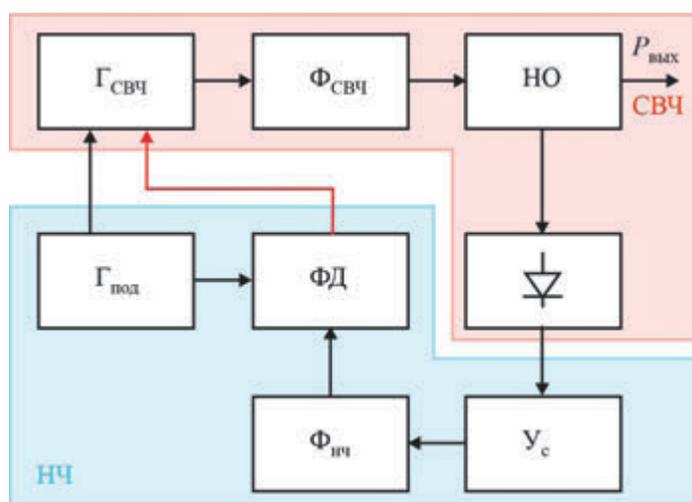


Рис. 1. Структурная схема стабилизации частоты СВЧ-генератора с микромодуляцией его частоты

СВЧ-генератор на частоту 10 ГГц ($\Gamma_{\text{СВЧ}}$) модулируется поднесущей частотой 500 кГц ($\Gamma_{\text{под}}$) с девиацией частоты ± 1 МГц (0,0001 %). Основной сигнал после СВЧ-фильтра поступает потребителю, а небольшая часть в несколько милливатт через направленный ответвитель подаётся на диод и после детектирования усиливается и подаётся на ФД, где сравнивается с фазой поднесущей частоты. При точном соответствии частоты генератора резонансной частоте фильтра на детекторе будет отсутствовать сигнал с частотой поднесущей (рис. 2), а выходное напряжение ФД будет равно нулю. В случае отклонения частоты генератора вверх или вниз от резонанса будет появляться сигнал поднесущей частоты, причём фаза этого сигнала будет зависеть от направления расстройки: частота ниже – сигнал в фазе, выше – сигнал в противофазе. Соответственно выходной сигнал ФД будет «подтягивать» частоту генератора к резонансной частоте контура. Естественно, при этом будет присутствовать некоторая остаточная расстройка, степень которой

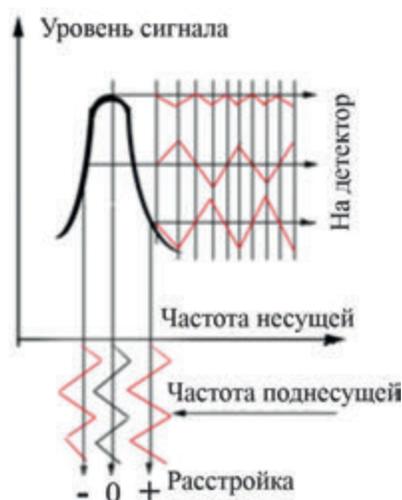


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала дискриминатора от расстройки частоты генератора

будет определяться величиной дестабилизирующего фактора и коэффициентом передачи во всей петле обратной связи: крутизной перестройки частоты генератора, добротностью СВЧ-контура, коэффициентом передачи детектора, коэффициентом усиления усилителя, коэффициентом передачи ФД. При правильном проектировании системы стабилизации остаточная расстройка может быть снижена в сотни и тысячи раз по сравнению с её отсутствием, то есть эксплуатационная стабильность частоты генератора будет определяться стабильностью опорного резонатора. Другими словами, простой полуволновой волноводный резонатор из суперинвара с добротностью порядка 500, умноженной на коэффициент передачи в несколько сотен и тысяч раз в системе стабилизации, в предлагаемой системе будет выполнять функции многомодовых, высокодобротных, дорогих и габаритных резонаторов, применявшихся в своё время. Предлагаемая система стабилизации частоты во много раз проще, дешевле, малогабаритнее по сравнению с многокаскадными умножительными цепочками от кварцевого генератора и систем с АПЧ по высоким гармоникам кварцевых генераторов.

Конечно, можно возразить, что сигнал в рассмотренном примере не «чистый» и содержит боковые от поднесущей частоты. Этот «недостаток» легко устраняется незначительным изменением структурной схемы, при котором микромодуляции подвергается не генератор СВЧ, а резонансная частота опорного резонатора.

Однако вариант с микромодуляцией несущей имеет неоспоримые преимущества, например, в случае реализации системы связи в диапазоне СВЧ при передаче узкополосных, в частности, голосовых сообщений. В этом случае при прямой модуляции звуковым сигналом несущей полоса сигнала в эфире будет равна 7 кГц, а при допустимой нестабильности частоты несущей 100 Гц она составит 10^{-8} , что обеспечить весьма трудно.

Положение кардинально меняется, если СВЧ-несущую модулировать по частоте поднесущей, которую, в свою очередь, модулировать передаваемым сигналом по фазе или частоте. В этом случае частота поднесущей на выходе первого детектора приёмника НЕ ЗАВИСИТ ОТ ИЗМЕНЕНИЙ ЧАСТОТЫ НЕСУЩЕЙ, а ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ТОЛЬКО НЕСТАБИЛЬНОСТЬЮ ГЕНЕРАТОРА ПОДНЕСУЩЕЙ. Это в некоторой степени упрощает требования к параметрам приёмного канала на участке от входа приёмника до первого детектора. При этом абсолютное значение нестабильности поднесущей, отнесённое к частоте несущей, улучшит частотную стабильность частоты канала связи в отношении $F_{\text{нес}}/F_{\text{подн}}$.

В цифровом примере, приведённом в начале, при нестабильности частоты поднесущей 50 Гц (10^{-4}) улучшение стабильности канала связи будет составлять $10 \text{ (ГГц)}/0,0005 \text{ (ГГц)} = 2 \cdot 10^4$, то есть в 20 тысяч раз лучше ($2 \cdot 10^{-8}$).

По этому принципу могут создаваться системы с 2-3-кратными видами модуляций: ЧМ/ЧМ, ЧМ/ФМ, ЧМ/ЧМ/ФМ, ЧМ/ЧМ/ЧМ и др. Другими словами, можно сказать, что СВЧ-канал связи с эффективной нестабильностью частоты канала связи на уровне 10^{-8} (и даже лучше) может быть создан путём использования сложных видов модуляции при вполне реализуемых значениях нестабильностей генераторов несущей и поднесущих, на уровне 10^{-4} .

За рубежом впервые о создании систем связи с поднесущими частотами (OFDM) заявила лаборатория Bell Labs. (США) в 1966 г. [1].

А у нас, реализуя идеи, высказанные выше, в 1965 г. была разработана СВЧ дуплексная полностью полупроводниковая радиостанция направленной (лучевой) высокоскрытной радиосвязи «Кит» с модуляцией ЧМ/ЧМ, генератор СВЧ – на ЛПД. Частоты передатчиков и соответственно приёмников разнесены на промежуточную частоту 70 МГц, что позволило

обойтись одним генератором СВЧ в каждом приёмопередатчике. Дальность связи – 2 км. Габариты – 217×142×36 мм, масса – 1,5 кг. В 1968 г. разработана и принята на вооружение для ВМФ радиостанция Р-622 (Кит-1) с модуляцией ЧМ/ФМ и волноводной СВЧ-системой (рис. 3) [2, 3]. Как видно из рис. 3, волноводная система имеет предельно минимальное число элементов, а некоторые из них являются частью элементов как приёмопередающего канала, так и системы стабилизации частоты: детектор как смеситель и детектор сигнала ошибки, опорный фильтр как эталон частоты, подавитель шумов гетеродина и элемент диплексера.



Рис. 3. Волноводная система радиостанции Р-622 и функции ее элементов

Как следует из рис. 3, СВЧ-элементы выполняют 2-3 функции, а диод является как элементом приёмника, так и элементом системы оптимизации. Дальность связи – до 20 км. Коэффициент скрытности факта связи – не менее 3000 раз. При этом мощность, излучаемая передатчиком Р-622, не превышала 5 мВт, в то время как применявшиеся для тех же задач УКВ-передатчики излучали мощности в 20...30 Вт! Ни зарубежных, ни отечественных аналогов подобных станций на момент разработки не существовало. Экспериментальные образцы за рубежом появились лишь в 1974 – 1980 гг., причём их устройство не описано. Аналоги на настоящий момент также неизвестны.

В период 1977 – 1983 гг. в соответствии с принципами микромодуляции была разработана радиостанция «Эрстед» (Р-604) в гибридно-интегральном исполнении СВЧ-модуля [4, 5]. В отличие от Р-622, её функции были существенно расширены. Во-первых, число переключе-

чаемых рабочих частот приёмопередатчиков увеличено с одной до четырех. Во-вторых, предусматривалось применение двух видов переключаемых антенн, с узкой и круговой диаграммой направленности, и ряда более мелких усложнений. Благодаря использованию микромодуляции и исполнению СВЧ-части в микрополосковом варианте, удалось уменьшить габариты и массу радиостанции в 2...2,5 раза. При этом принцип стабилизации частоты несущей по электронно-переключаемым диэлектрическим резонаторам сохранился. На рис. 4 и 5 представлен вид СВЧ-части системы модуля радиостанции «Эрстед» (со снятыми крышками). При любом другом способе, известном на тот момент, задачу стабилизации переключаемых частот в заданных габаритах, включая преобразовательно-усилительную часть приёмника (МШУ, входные фильтры, УПЧ, опорные фильтры и элементы схемы оптимизации), в те годы (1975 – 1977 гг.) вряд ли можно было бы решить.

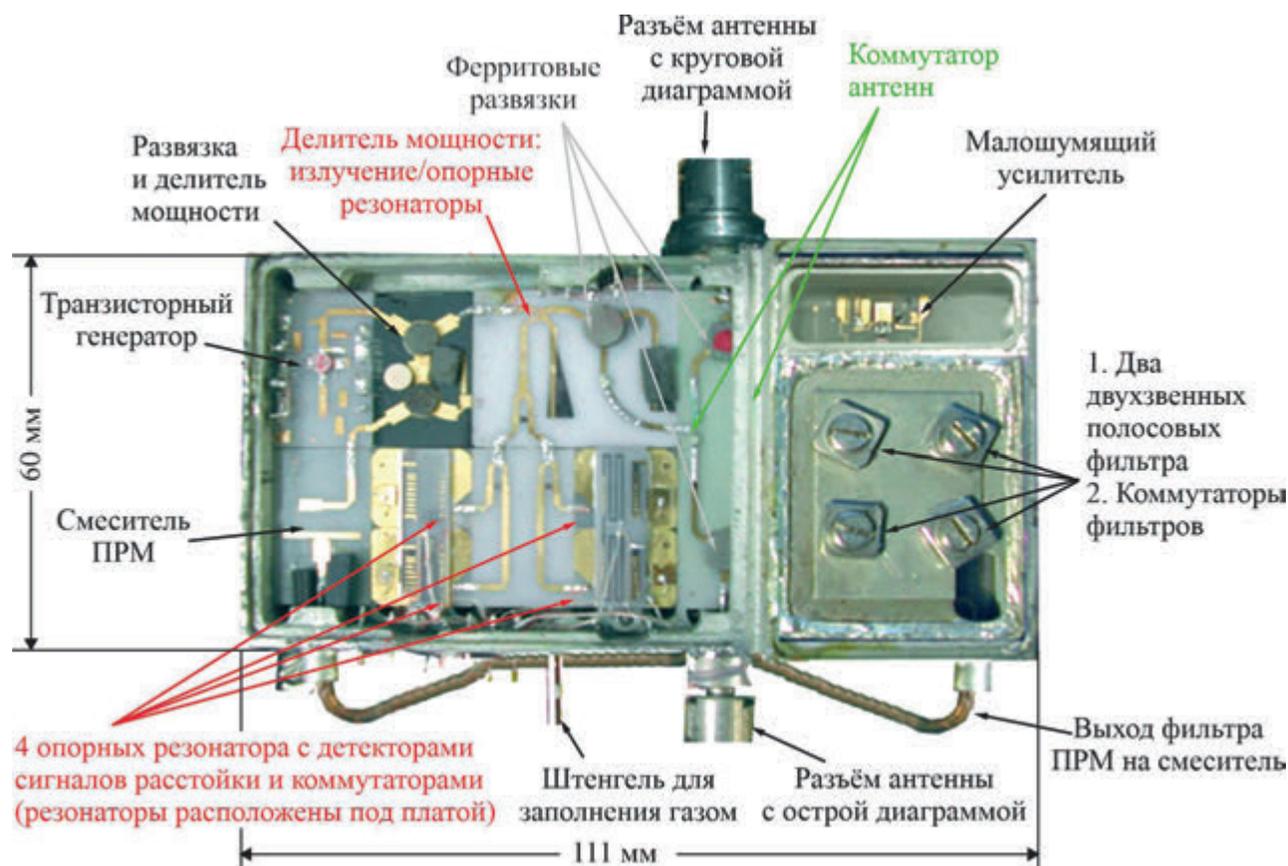


Рис. 4. СВЧ-микрополоски модуля «Эрстед» (крышки сняты)

В период 1970 – 1973 гг. на «Истоке» были начаты работы по созданию полностью полупроводниковых СВЧ радиорелейных цифровых станций для внутрирайонных сетей связи. Инициаторами выступили специалисты Центрального НИИ Министерства связи, создавшие цифровую кабельную многоканальную аппаратуру. Прокладка десятков километров кабелей представлялась дорогостоящим и не всегда надёжным вариантом. Радиорелейные СВЧ-станции (РРС) решали эту проблему кардинально. Но было одно новое для того времени условие: вся аппаратура РРС, включая приёмный и передающий модемы, должна располагаться на мачтах, домах на открытом воздухе. Ничего подобного в стране не было. Было:

аппаратура внизу – сигналы по кабелю или волноводу к антенне наверху. Имея опыт создания Р-622, мы взялись за эту разработку. Естественно, гетеродины приёмника и передатчика были на ЛПД со стабилизацией частот по опорным резонаторам методом микромодуляции и нестабильностью во всех условиях 10^{-4} [5–8]. Запад в это время использовал умножители или синхронизацию по гармоникам.

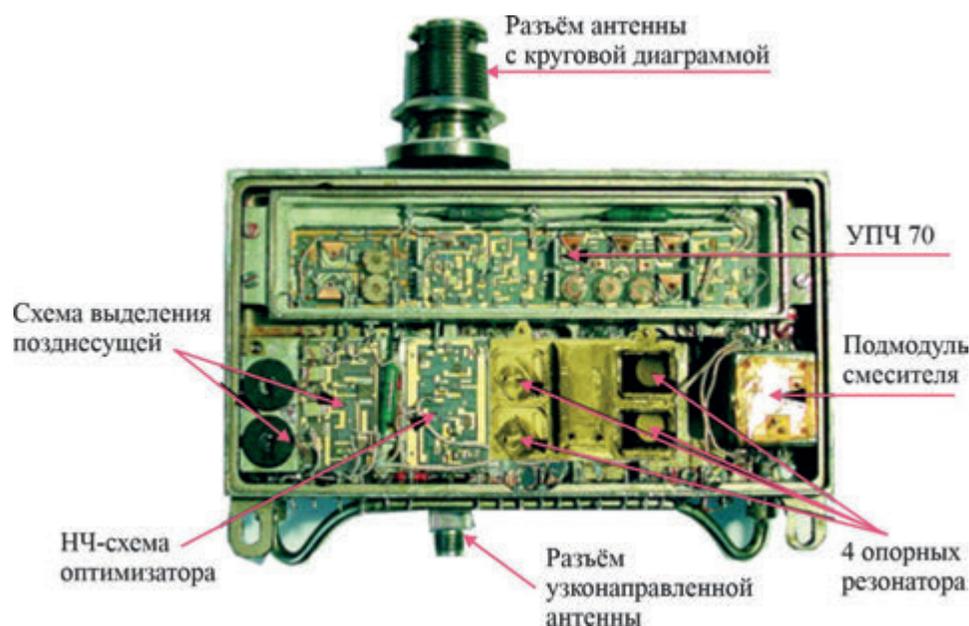


Рис. 5. Вид узлов модуля радиостанции «Эрстед» с нижней стороны

Первая РРС была разработана в 1971 г. и должна была работать с аппаратурой уплотнения ИКМ-12 в диапазоне 7,9...8,4 ГГц. Однако в связи со сменой диапазона для РРС низовой связи на диапазон 10,7...11,7 ГГц работу нужно было начинать снова. В 1975 г. была разработана РРС «Радан-1». В мае 1976 г. была начата годовая опытная эксплуатация РРС «Радан-1» на одновременную передачу 12 телефонных каналов по одному радиоканалу, закончившаяся успешно с принятием решения о промышленном выпуске и внедрении РРС «Радан-1» на сетях связи страны. Кстати, «Исток» был первым в СССР, который создал цифровые радиорелейки. В 1981 г. была разработана РРС «Радан-2», в которой стабилизация частоты ГЛПД обеспечивалась также с помощью микромодуляции опорного резонатора. В 1988 г. были завершены разработки РРС «Радан-МС» и «Радан-МГ» на новой конструктивно-технологической базе, в которых применялись цифровые синтезаторы и микрополосковая технология без использования микромодуляции.

В 2010 г. в техническом проекте «Овод» [9] по оценке возможности создания РЛС с ЛЧМ и работы на одну антенну для ракет, поражающих беспилотники, теоретически просчитаны способы подавления сигнала собственного передатчика на вход приемника за счёт оперативного согласования антенны по амплитуде и фазе с применением микромодуляции. Получены обнадеживающие результаты (рис. 6). При этом компенсация должна не просто минимизировать отражения от антенны, но и обеспечивать подавление мощности, поступающей на вход приёмника против направления циркуляции циркулятора (3 мВт и 3 мВт, см. рис. 6), в том числе с учётом изменения частоты излучаемого ЛЧМ-сигнала.

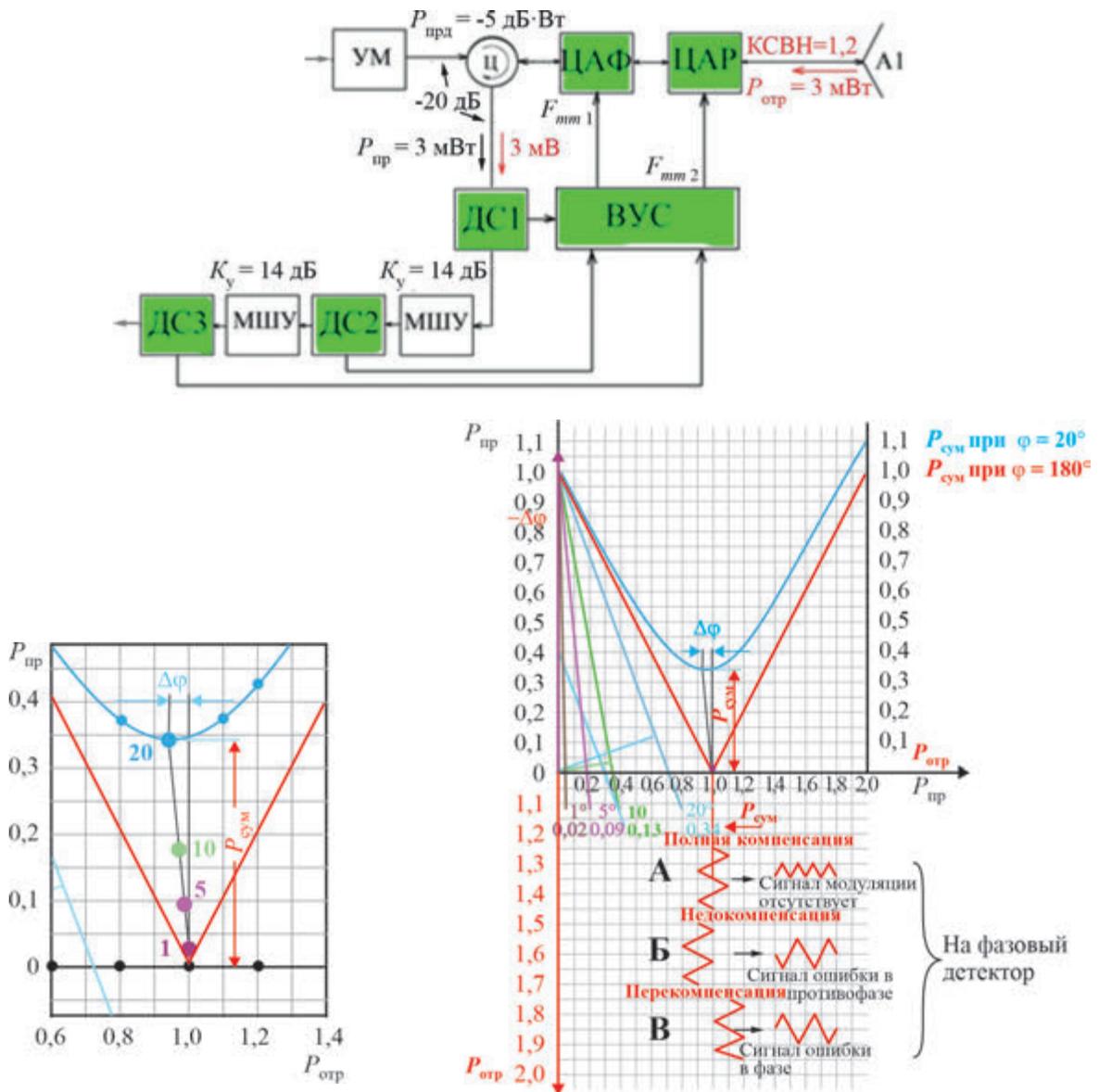
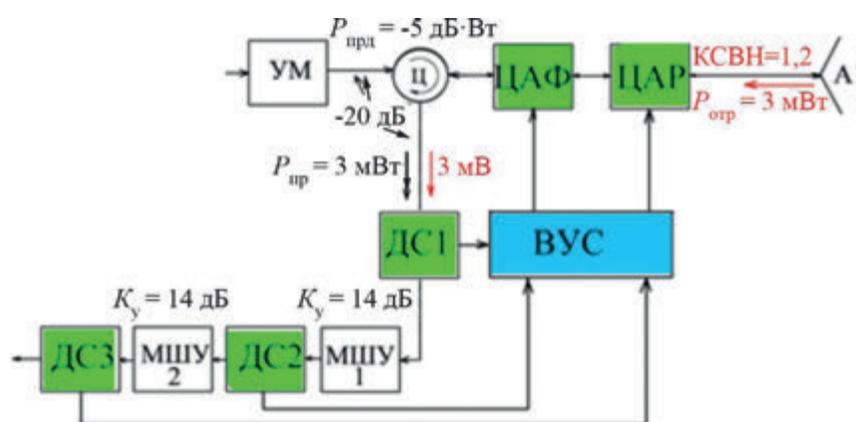


Рис. 6. К пояснению принципа работы системы оптимизации параметров аппаратуры методом микромодуляции параметров сигналов:

■ – элементы оптимизатора; ЦАФ – цифроаналоговый фазовращатель; ЦАР – цифроаналоговый рассогласователь; ВУС – вычислительно-управляющая схема; ДС – диодная секция;

$$K_{ш} = 7 \text{ дБ}, \Delta F_{50} = 50 \text{ Гц} = +17 \text{ дБ}; P_{ш} = -204 + 7 + 17 = -180 \text{ дБ} \cdot \text{Вт}; P_{с.мин} = -170 \text{ дБ} \cdot \text{Вт}$$

Как следует из схемы, для максимальной оптимизации необходимо микромодулировать два элемента: ЦАФ и ЦАР, то есть необходимо использовать две частоты микромодуляции. Применение трёх диодов сигналов ошибки объясняется большим диапазоном изменения сигналов и возможным насыщением выходных сигналов усилителей. Возможная степень подавления мощности передатчика и состав отражателя и фазовращателя показаны на рис. 7.



КСВН	1,01	1,05	1,10	1,15	1,25	1,50	1,75	2,00	2,5
P, дБ	46,02	32,25	26,45	23,12	19,09	13,98	11,29	9,54	7,36

Рис. 7. Структурная схема системы подавления мощности ПРД в приемном тракте РЛС:

■ – СВЧ, ■ – НЧ элементы оптимизатора; ЦАФ – 3...4-разрядный цифровой и одноразрядный аналоговый фазовращатель; ЦАР – цифроаналоговый рассогласователь с диапазоном регулировки КСВН 1,0...2,5; ДС – диодная секция с направленным ответвителем с $K_n = -10$ дБ и одним детекторным диодом; ВУС – вычислительно-управляющая схема; $K_{ш} = 7$ дБ, $\Delta F_{50} = 50$ Гц = +17 дБ; $P_{ш} = -204 + 7 + 17 = -180$ дБ·Вт; $P_{с.мин} = -170$ дБ·Вт

Блок ВУС обеспечивает:

- генерацию двух модулирующих частот (F_ϕ и F_p);
- предварительный анализ выходных сигналов диодных секций ДС1, ДС2 и ДС3;
- выполнение режима поиска и обеспечение режима компенсации сигналов;
- цифровое и аналоговое управление ЦАФ- и ЦАР-модуляторами;
- фазовое детектирование сигналов ДС;
- замыкание петли отрицательной обратной связи с целью обеспечения максимального подавления шумов синтезатора.

Структурная схема блока ВУС представлена на рис. 8. Все комплектующие аналоговые, низкочастотные.

Возможность подавления мощности собственного передатчика в системах, работающих в непрерывном режиме на одну антенну, сложная и важная задача, существенная в плане качественного улучшения радиолокационной и связной аппаратуры. Предлагаемый вариант решения этой задачи заслуживает внимательного изучения и постановки соответствующих исследований. Насколько микромодуляционная технология совестима и плодотворна в случае цифровых систем, покажет время.

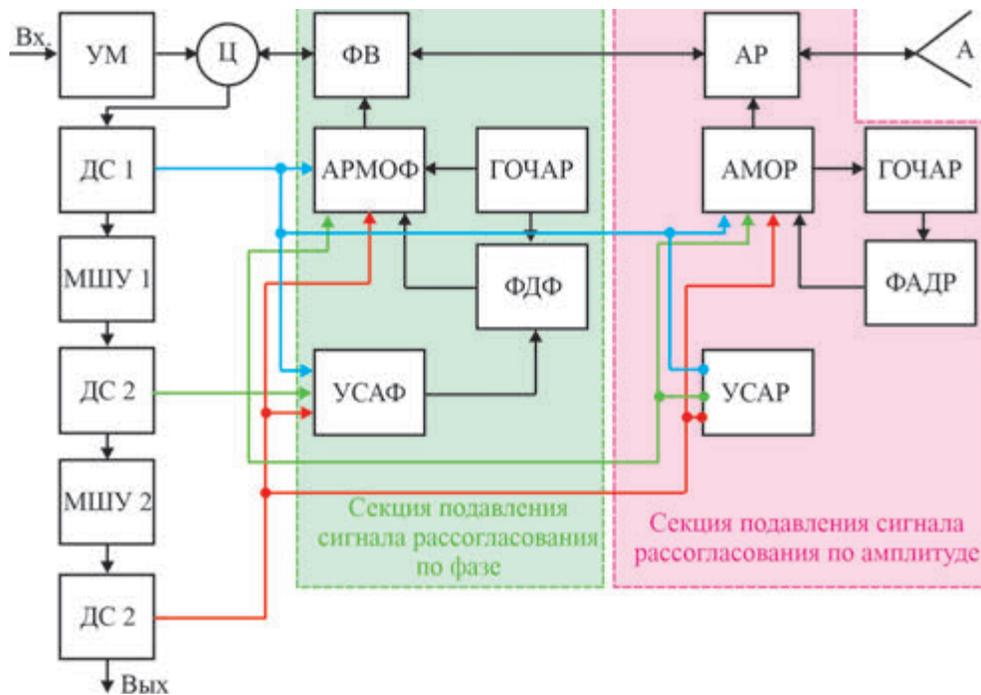


Рис. 8. Структурная схема вычислительно-управляющего блока:

УМ – усилитель мощности; Ц – циркулятор; ДС1, ДС2, ДС3 – диодные секции 1...3; МШУ1, МШУ2 – маломощные усилители 1, 2; ФВ – фазовращатель; АРМОФ – автоматический регулятор модуляции фазы; ГОЧАФ – генератор опорной частоты фазовращателя; ФДФ – фазовый детектор фазовращателя; УСАФ – усилитель амплитуды сигнала ошибки фазовращателя; АР – амплитудный рассогласователь; АМОП – автоматический регулятор модуляции рассогласования; А – антенна; УСАР – усилитель амплитуды сигнала ошибки рассогласователя; ГОЧАР – генератор опорной частоты рассогласователя; ФАДР – фазовый детектор рассогласователя

Выражаю искреннюю благодарность В. И. Криворучко, первому читателю рукописи статьи, во-первых, за то, что, ознакомившись с её содержанием, он отметил сохраняющуюся новизну предлагаемого способа, несмотря на то, что она реализована в конкретных разработках 50 лет тому назад, и, во-вторых, за то, что его вопросы и замечания явно способствовали улучшению ясности изложения предлагаемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chang, R. W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multi-channel data transmission // Bell System Technical Journal. – 1966. – Vol. 45 (10). – P. 1775 – 1796. – DOI: 10.1002/j.1538-7305.1966.tb02435.x(<https://doi.org/10.1002%2Fj.1538-7305.1966.tb02435.x>).
2. Радиостанция Р-622: техническое описание. – 3.630.002ТО. – Редакция 2-77.
3. Портативная радиостанция на 8,8 ГГц / Форум radioscanner.ru>forum/topic25923/html.
4. Радиостанция Р-604: техническое описание. – бВ0.200.009ТО.

5. Отработка технологических процессов и корректировка технической документации на этапе освоения изделия «Эрстед» в серийном производстве: техн. отчет: тема 6100 / руководитель С. А. Перегонов. – Инв. № 170-7960. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина», 1987.

6. Разработка комплекса оборудования малоканальной радиосвязи ИКМ-СВЧ: техн. отчет: тема 4520 / руководитель С. А. Перегонов. – Инв. № 141-5622. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина», 1978.

7. Разработка комплекса связи для сельских районов страны с ёмкостью 2×15 в диапазоне 10,7...11,7 ГГц: техн. отчет: тема 2160 / руководитель С. А. Перегонов. – Инв. № 43-6240. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина», 1981.

8. Модернизация изделия «Радан-2» и корректировка конструкторско-технологической документации по результатам опытной эксплуатации и линейных испытаний в процессе внедрения изделия в производстве: техн. отчет: тема 1680 / руководитель С. А. Перегонов. – Инв. № 97-7022. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина», 1984.

9. Тема «Овод»: инициативный проект / руководитель С. А. Перегонов. – Авторская рукопись. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2010.

Статья поступила 5 декабря 2022 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

КУРУШИН А. А. Гибридное моделирование в HFSS ANSYS. – М.: СОЛОН-Пресс, 2023. – 292 с., с илл.

Книга посвящена применению программы HFSS ANSYS для гибридного моделирования СВЧ-структур – усилителей, фильтров, объемных интегральных схем, активных антенн и приемно-передающих блоков фазированных антенных решеток. В ней раскрываются многие понятия, важные при моделировании многослойных интегральных схем, связываются топология и схематическое представление, с помощью HFSS ANSYS выполняется расчет смещения по постоянному току, расчет сигнальных и шумовых характеристик в диапазоне СВЧ и КВЧ.

Книга предназначена для углубления сведений о моделировании современных гибридных излучающих интегральных схем и, надеемся, будет полезной для студентов, аспирантов и научных работников, работающих в области СВЧ.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.632

РЕЖИМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ/ВЫКЛЮЧЕНИЯ ЭОС С КОЛЬЦЕВЫМ КАТОДОМ В ЛБВ С НИЗКОВОЛЬТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Ю. Ю. Филин, С. П. Морев, Н. М. Коломийцева,
О. А. Арион, П. А. Комраков, А. В. Соляников

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

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов включения (выключения) в электронно-оптической системе с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением током пучка. Найдены конфигурация и местоположение пассивного защитного устройства (коллиматора), обеспечивающего надежную защиту от повышенного токооседания и тепловой перегрузки входного участка замедляющей системы в переходных режимах работы ЛБВ. Приведены результаты испытаний ЛБВ с найденной формой коллиматора.

КС: переходные процессы, электронно-оптическая система (ЭОС), коллиматор, тепловая перегрузка

ON/OFF MODES OF EOS WITH AN ANNUAL CATHODE IN A TWT WITH A LOW-VOLTAGE CONTROL

Yu. Yu. Filin, S. P. Morev, N. M. Kolomiytseva,
O. A. Arion, P. A. Komrakov, A. V. Solyanikov

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

The results of theoretical and experimental studies of on/off transients in electron-optical system with an annual cathode and low-voltage gridless beam current control are presented. The configuration and location of a passive protective device (collimator) which provides reliable protection against increased current settling and thermal overload of the input section of the slow-wave structure in transient TWT operating modes, are found. The results of TWT tests with the found shape of the collimator are demonstrated.

Keywords: transients, electron-optical system (EOS), collimator, thermal overload

1. ВВЕДЕНИЕ

Лампы бегущей волны (ЛБВ) с магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС) и управлением тока пучка нашли широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре.

Одним из требований, предъявляемых к электронно-оптической системе (ЭОС) ЛБВ, является обеспечение работы лампы в режиме модуляции, при котором происходит частичная или полная отсечка тока пучка за счет подачи соответствующих потенциалов на электроды пушки. Такие режимы модуляции требуются для циклического или апериодического изменения уровня вы-

ходной мощности или, при отсутствии полезного сигнала на входе прибора, для подавления шумовой мощности на выходе. Подобная отсечка тока в ЛБВ происходит при переходном процессе включения или выключения прибора. Для низковольтного управления током пучка вблизи катода электронной пушки обычно используют фокусирующие электроды, сеточные структуры, штыри, промежуточные аноды и тому подобное [1].

Основным недостатком работы ЛБВ при этих режимах является то, что требуемое ослабление тока пучка в ряде случаев происходит при таких значениях модулирующих напряжений, при которых имеет место локальный максимум оседания тока на входной участок замедляющей системы (ЗС), что может приводить к преждевременному выходу из строя прибора [2–4]. В этом случае определенные участки пролетного канала подвергаются воздействию максимальных тепловых нагрузок при каждом включении (выключении) тока пучка прибора. В коротковолновой части СВЧ-диапазона структурные элементы ЭОС уменьшаются, а интенсивность тепловых нагрузок увеличивается. Поэтому, несмотря на кратковременность переходного процесса включения (выключения) по сравнению со временем работы прибора в номинальном режиме, последствием тепловых перегрузок может явиться разрушение ЗС и выход прибора из строя, особенно при большом (до $\sim 10^6$) числе циклов (включение/выключение).

Наиболее широко распространенными способами управления током пучка в ЭОС, работающих в непрерывном режиме, являются способы изменения тока пучка с помощью потенциала фокусирующего электрода или анода, а для импульсных приборов, в которых требуется полная или частичная отсечка тока, такие режимы обеспечиваются потенциалами, подаваемыми на дополнительные электроды (сеточные структуры), располагаемые вблизи катода.

Исследования формирования и транспортировки электронных потоков при управлении током пучка потенциалом анода описаны в работе [5, 6], а с помощью потенциала фокусирующего электрода – в [7].

Анализ публикаций в отечественной и иностранной научной литературе показал, что формирование электронного потока в ЭОС, в которых режимы отсечки тока пучка осуществлены за счет потенциалов, подаваемых на электроды, расположенные вблизи кольцевого катода, изучено далеко не полностью.

В настоящей работе рассмотрены формирование и транспортировка электронного потока в ЭОС, в которой низковольтное управление током пучка осуществлено фокусирующим электродом и штырем, соосно расположенными вблизи кольцевого катода.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Была рассмотрена ЭОС ЛБВ, в которой вблизи катода с кольцевой эмитирующей поверхностью соосно расположены фокусирующий электрод и штырь, за счет чего в электронной пушке был сформирован кольцевой электронный поток, сходящийся в области пролетного канала в сплошной. Данная ЭОС с управляющими электродами, потенциал на которых в рабочем режиме равен потенциалу катода, позволяет управлять током пучка минимальными напряжениями. Однако изменения потенциалов на этих электродах могут приводить к сильным возмущениям пучка по краям катода и нарушению ламинарности потока, его оседанию на других электродах и ЗС. Дополнительная регулировка тока пучка в рассмотренной ЛБВ обеспечивалась потенциалом первого анода U_{a1} , величина которого была меньше потенциала $U_{зс}$ спиральной ЗС.

Для транспортировки электронного пучка в ЛБВ была применена МПФС с несинусоидальным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля и значимой величиной третьей

гармоники [8], позволившая обеспечить устойчивую транспортировку потока при пониженных потенциалах ЗС.

В процессе испытаний было выявлено, что после циклических изменений режимов включения/выключения ЛБВ наблюдалась локальная тепловая перегрузка входного участка ЛБВ в области ВЧ-ввода энергии, приводящая к выходу прибора из строя.

Как и в [5], распределение оседания тока пучка на элементы ЭОС в переходном режиме включения или выключения может быть найдено в квазистационарной постановке, согласно которой распределение потенциала и траектории в ЭОС в каждый момент времени t находилось из решения самосогласованной задачи расчета траекторий пучка с учетом поля пространственного заряда при потенциалах на электродах $\{U\}_{t=ti} = \{U(t_i)\}$. Тепловая нагрузка $P(z, t_i)$ определялась как $P(z, t_i) = I_{3c}(z, t_i)U_{3c}$, где z – продольная координата в направлении движения пучка, а $I_{3c}(z, t_i)$ – величина распределенного оседания тока на пролетный канал в момент времени t_i .

Следует отметить, что величины потенциалов, управляющие током пучка, могут значительно изменяться во время переходного процесса по сравнению с номинальными значениями, из-за чего влияние поперечных скоростей электронов как в области пушки, так и в области пролетного канала может существенно возрастать.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены расчёты в номинальном режиме работы ЭОС, параметры которой представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	380,0
Ускоряющее напряжение, В	9000
Микропервеанс, мкА/В ^{3/2}	0,445
Диаметр катода, мм	3,7
Диаметр канала, мм	2,0
Тип катода	Импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см ²	6,7
Плотность тока в пучке, А/см ²	41,6
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	22,4
Компрессия пучка по площади (реальная)	10

Таблица 2

Параметры МФС

Амплитуда поля на оси, Гс	2100
Период МПФС, мм	25,7
Параметр магнитного поля	0,9
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,354
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,354
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,539
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,539

Из анализа результатов расчетов (рис. 1) следует, что под воздействием фокусирующих электродов пучок из кольцевого в области электронной пушки из-за перемешивания траекторий электронов переходит в аксиально-симметричный сплошной пучок в области пролетного канала. Кроме того, расположение управляющих электродов на разном расстоянии от краев катода приводит к неравномерному запираю катода, начиная с его внутренней части (рис. 2, в)

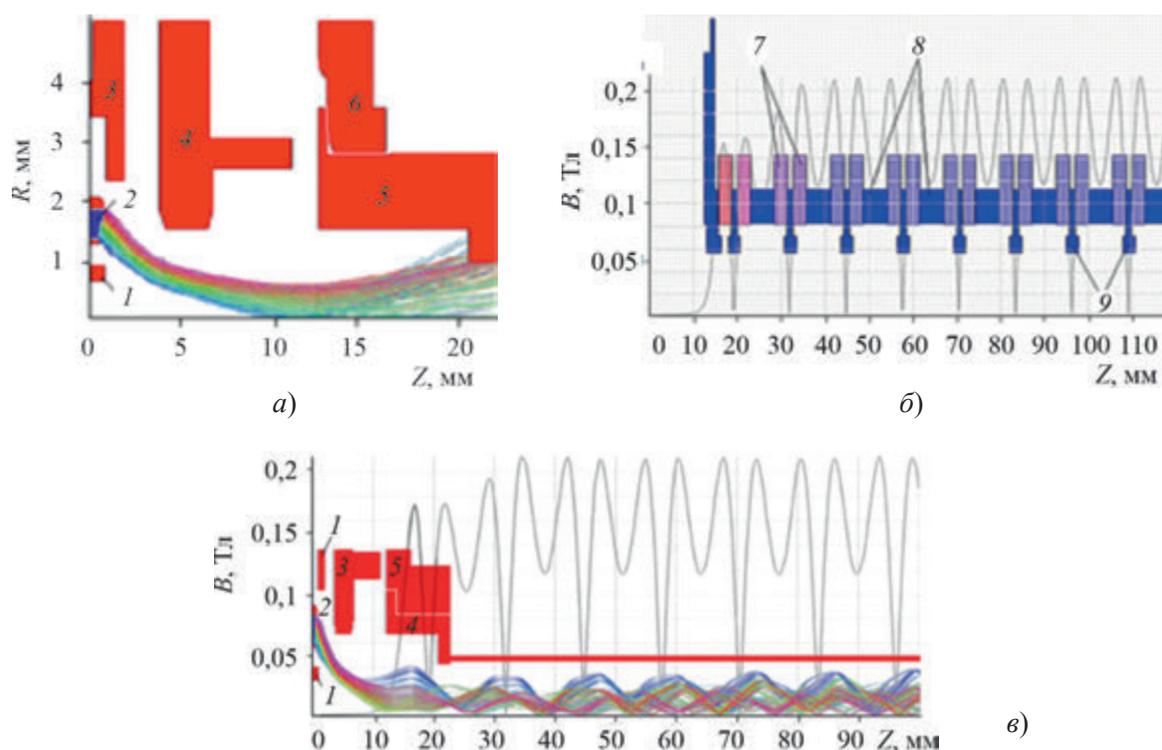


Рис. 1. Траектории электронного потока в электронной пушке (а), распределение осевой компоненты индукции магнитного поля (б) и траектории электронного потока (в) в первой секции ЛБВ:

1 – управляющий электрод (штырь); 2 – катод; 3 – управляющий электрод; 4 – первый анод; 5 – коллиматор; 6 – второй анод; 7 – магниты; 8 – магнитомягкие вставки; 9 – полюсные наконечники

Для исследования переходных режимов работы ЭОС были проведены обширные расчеты процессов формирования пучка в переходных процессах включения/выключения тока пучка и определения места его повышенного оседания на стенки пролетного канала. Анализ результатов расчетов показал, что механизм аномально высокого оседания электронного потока на входной участок ЗС связан с тем, что при определенных значениях напряжений на фокусирующих электродах происходит локальное оседание части тока пучка на пролетный канал в области расположения коаксиального ввода энергии, которое связано с возмущениями пучка под действием близко расположенных фокусирующих электродов.

Кроме того, оказалось, что отличительной особенностью формирования кольцевого электронного потока в переходных режимах включения/выключения является пространственный перехлест электронов кольцевого пучка, при котором внутренний край кольцевого пучка становится внешним краем электронного потока, а внешний край кольцевого потока образует

внутреннюю границу кольцевого потока. При подаче во время переходного процесса более низких значений напряжений на управляющие электроды частичное оседание пучка происходит за счет электронов с внутренней части катода, а при увеличении напряжений – за счет электронов с внешней части катода (рис. 2, а...в). Для сплошных аксиально-симметричных потоков характерно «схлопывание» пучка на оси ЭОС [7]. Таким образом, на вход МПФС во время переходного процесса включения/выключения поступает неламинарный электронный поток, в котором радиальное положение электронов и углов наклона электронов к оси ЭОС совершенно неоптимально для заданной переходной области магнитного поля МПФС, что приводит к повышенным пульсациям электронного потока в области пролетного канала и оседанию части электронного потока на входной участок ЗС. Анализ результатов расчета (рис. 2, з) показал, что при переходном режиме включения/выключения величина тока, оседающего на входную секцию ЛБВ, может достигать 60 мА, а в области расположения СВЧ-ввода ЛБВ локально оседает 15 мА.

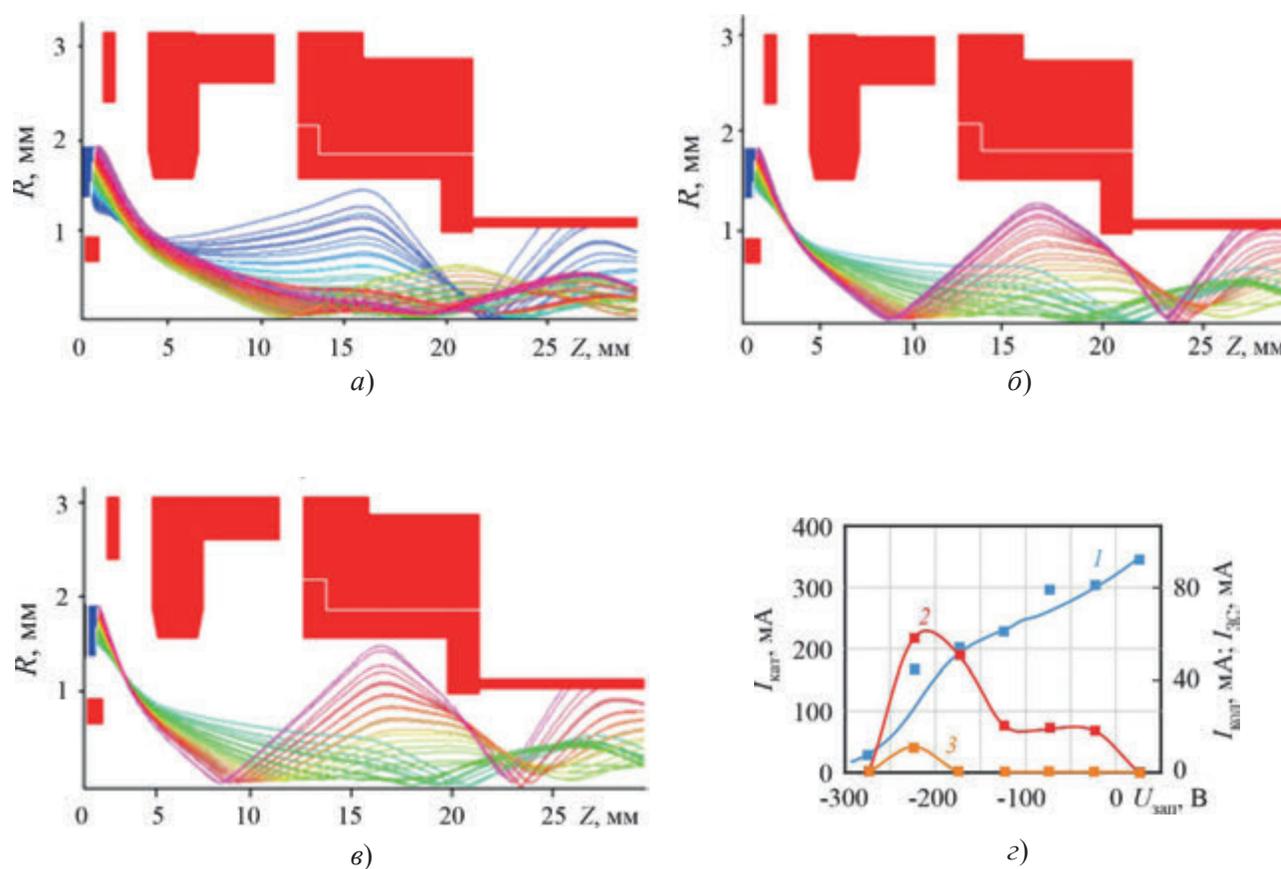


Рис. 2. Транспортировка электронного потока в первой секции ЛБВ во время переходного режима (а...в) и зависимости (з) тока катода (1), тока ЗС (2) и тока коллиматора (3) от потенциала на управляющих электродах:

а – $U_{\text{фок}} = -50$ В; б – $U_{\text{фок}} = -200$ В; в – $U_{\text{фок}} = -250$ В

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из-за локального оседания части тока на входной участок ЗС, включающий в себя первые витки спирали и закрепленные на них настроечные элементы, происходит его тепловая перегрузка (вплоть до расплавления) и нарушение согласования КСВН входной секции ЛБВ (рис. 3).

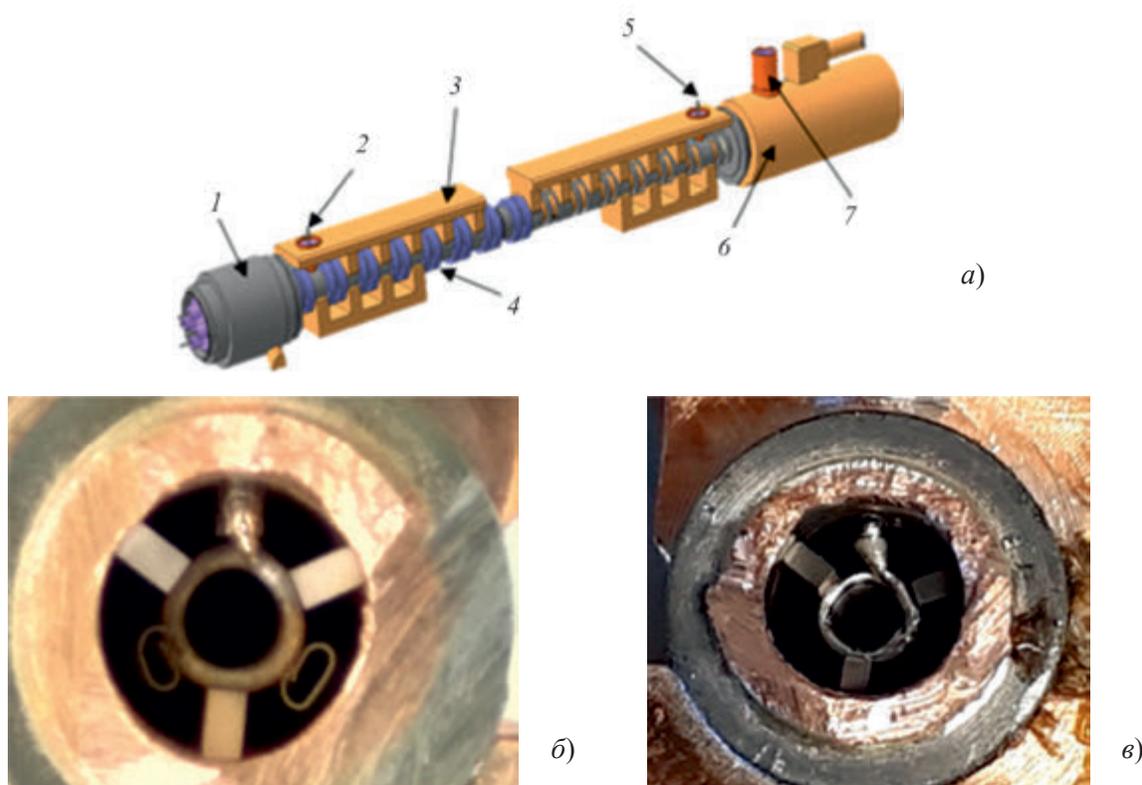


Рис. 3. Внешний вид ЛБВ (а) и вид входного участка ЗС со стороны пушки во время сборки (б) и после выхода прибора из строя (в):
 1 – электронная пушка; 2 – коаксиальный ввод энергии; 3 – блок с линией замедления;
 4 – кольцевые магниты; 5 – коаксиальный вывод энергии; 6 – коллектор; 7 – вывод коллектора

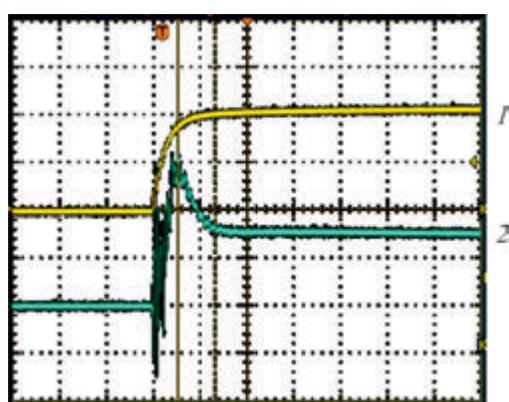


Рис. 4. Импульс модулятора и ток ЗС во время включения ЛБВ:
 1 – импульс модулятора; 2 – ток ЗС

При малых временах нарастания/спада фронтов модулирующих импульсов напряжений на фокусирующих электродах электронной пушки непосредственное измерение величины тока, оседающего на элементы ЭОС, являлось затруднительным. С целью увеличения длительности фронта была проведена корректировка электрической схемы модулятора путем включения в его цепь дополнительного конденсатора, что позволило увеличить длительность фронта более чем на порядок и провести цикл экспериментальных исследований. В результате этого, с помощью детекторов, подключенных к осциллографу, удалось зафиксировать фронт импульса модулятора и тока ЗС. На полученных осциллограммах (рис. 4) видно резкое увеличение тока ЗС во время переходного процесса

включения ЛБВ в интервале изменения напряжений на управляющих электродах от -50 до -250 В. В этом случае повышение среднего тока ЗС в режиме с малой длительностью импульса происходило из-за увеличивающегося влияния фронтов нарастания/спада фокусирующих напряжений. Следует заметить, что использование для переходных режимов включения/выключения сеточной структуры вместо структуры «фокусирующий электрод – штырь» позволяет в какой-то мере улучшить ситуацию с тепловой перегрузкой входного участка ЗС за счет уменьшения величин потенциалов управления и соответственно уменьшения интервалов времени фронтов нарастания/спада импульсов потенциалов управления. Однако использование их в ЛБВ коротковолновой части СВЧ-диапазона наталкивается на серьезные технологические трудности в изготовлении и точном совмещении сеточных структур, а также в борьбе с эмиссией электронов с этих структур.

Как было показано в предыдущем разделе теоретических расчетов, коллиматор в рассматриваемой ЭОС не защищает элементы ЗС в момент переходных процессов. Наиболее простым решением задачи защиты входного участка ЗС представлялся поиск конфигурации коллиматора с удлиненной узкой частью для перехвата несогласованного пучка в области расположения второго анода, без допуска его в область взаимодействия. На основе проведенных дополнительных расчетов (рис. 5, а...в) были найдены оптимальная конфигурация коллиматора с удлиненной узкой частью и местоположение его относительно электронной пушки, это позволило надежно защитить элементы настройки ЗС от повышенного токооседания, не препятствуя при этом транспортировке электронного потока в рабочем режиме работы ЛБВ (рис. 5, г).

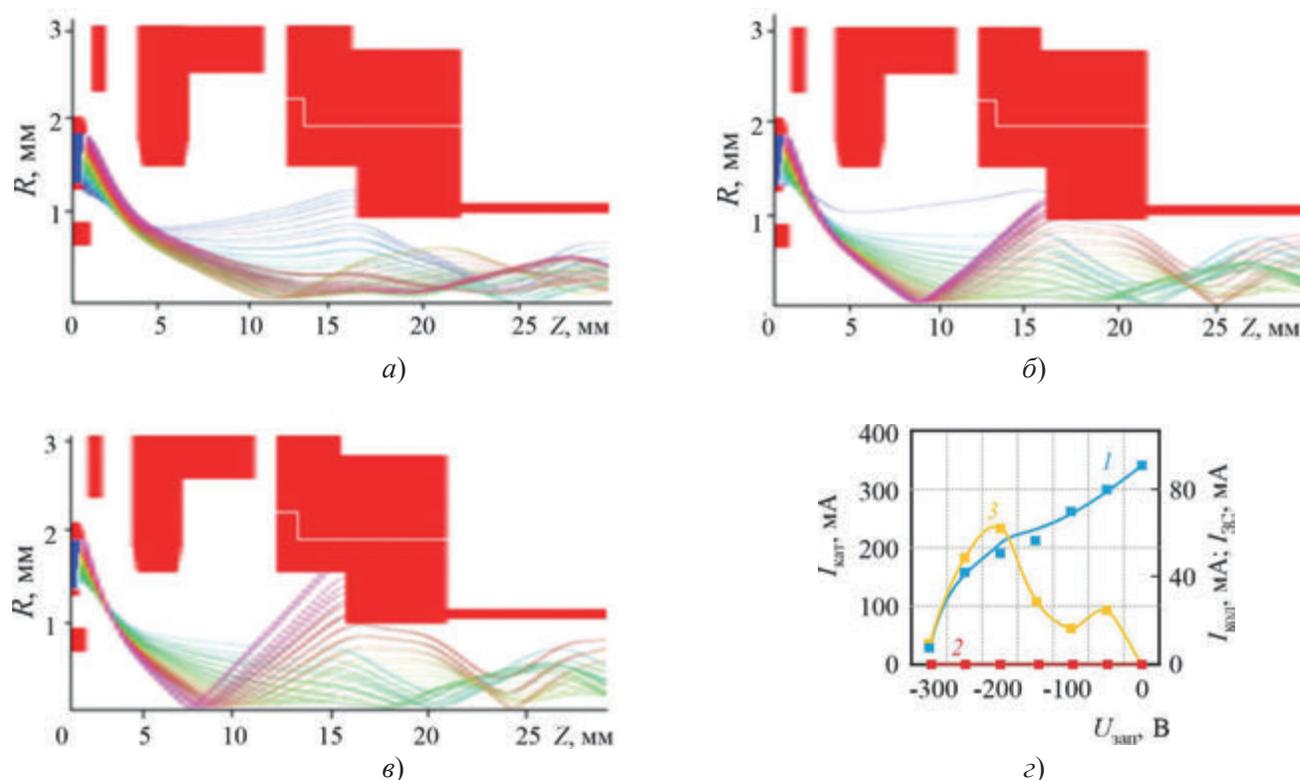


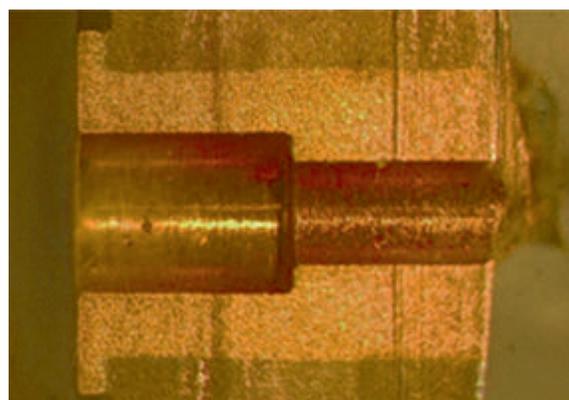
Рис. 5. Транспортировка электронного потока в первой секции ЛБВ с измененной конфигурацией коллиматора во время переходного режима (а...в) и зависимости (г) тока катода (1), тока ЗС (2) и тока коллиматора (3) от потенциала на управляющих электродах:

$$a - U_{\text{фок}} = -50 \text{ В}; \quad б - U_{\text{фок}} = -200 \text{ В}; \quad в - U_{\text{фок}} = -250 \text{ В}$$

После анализа полученных результатов был изготовлен образец ЛБВ с найденной конфигурацией коллиматора и проведены дополнительные динамические испытания в режимах с малой длительностью импульса. Во время испытаний ЛБВ с достаточно долгим временем работы в режиме с малой длительностью импульса ток ЗС не увеличивался, а КСВН входной секции и выходная мощность не изменялись, что косвенно свидетельствовало об отсутствии тепловой перегрузки первых витков спирали. После окончания испытаний и вскрытия ЛБВ, на втором аноде были обнаружены следы токооседания (рис. 6, *а*), а на коллиматоре – следы побежалости в области изменения диаметра узкой части коллиматора (рис. 6, *б*). Следует отметить, что место перегрева коллиматора практически совпало с расчетным местоположением повышенного оседания части электронного потока. Все настроечные элементы на входном участке ЗС сохранились (рис. 6, *в*).



а)



б)



в)

Рис. 6. Анод (*а*), новый коллиматор со следами токооседания (*б*) и входной участок ЗС с настроечными элементами (*в*)

5. ВЫВОДЫ

Выявлен и объяснен механизм аномального перегрева настроечных элементов ЗС в переходных режимах работы ЛБВ. Предложен путь снижения локального оседания части электронного потока на первых витках спирали с расположенными на них настроечными элементами при переходных режимах включения/выключения ЛБВ.

Изготовлен и испытан экспериментальный образец ЛБВ с измененной конфигурацией коллиматора, который обеспечил надежную защиту от тепловой перегрузки входного участка в пе-

реходных режимах включения/выключения, не ухудшая транспортировку пучка в номинальном режиме работы ЛБВ. Положение следов побежалости, обнаруженных на внутренней поверхности коллиматора после проведения испытаний ЛБВ и ее вскрытия, указывает на хорошее соответствие расчетных данных с экспериментальными результатами.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Павла Михайловича Мелешкевича за постоянный интерес, ценные замечания и помощь при выполнении этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Григорьев, Ю. А.** / Ю. А. Григорьев, Б. С. Правдин, В. И. Шестеркин // *Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ.* – 1987. – Вып. 7 (1246) . – М.: Изд-во ЦНИИ «Электроника». – 71 с.
2. **Алямовский, И. В.** *Электронные пучки и электронные пушки* / И. В. Алямовский. – М.: Сов. радио, 1966. – 456 с.
3. **Glass, E.** 30 to 50 GHz high-power TWTS / E. Glass // *Microwave Journal.* – 1983. – Vol. 26, No 10. – P. 77 – 78, 82, 84 – 87.
4. **Hansen, J. W.** Multiple output supplies mast mut TWT demandes / J. W. Hansen // *Microwaves.* – 1982. – Vol. 21, No 7. – P. 63 – 64, 67 – 69.
5. **Морев, С. П.** Исследование особенностей процессов управления током пучка в электронно-оптических системах приборов О-типа / С. П. Морев, А. Н. Якунин // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.* – 1987. – Вып. 5 (399). – С. 31 – 35.
6. **Морев, С. П.** Уменьшение величины и протяженности области аномального токооседания при управлении током пучка в ЭОС приборов О-типа / С. П. Морев, В. И. Роговин, Г. Ю. Юдин // *Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-98: материалы Международной научно-технической конференции.* – 1998. – Т. 1. – С. 209 – 212.
7. **Морев, С. П.** Уменьшение величины и протяженности области оседания пучка на пролетный канал ЛБВО в режимах модуляции с помощью потенциала фокусирующего электрода электронной пушки / С. П. Морев // *Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-2000: материалы Международной научно-технической конференции.* – 2000. – С. 150 – 155.
8. **Дармаев, А. Н.** Повышение параметра магнитного поля в фокусирующих системах с негармоническим распределением магнитного поля / А. Н. Дармаев, С. П. Морев // *Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-2006: материалы Международной научно-технической конференции.* – Саратов, 2006. – С. 382 – 389.
9. Использование коллиматора специальной формы в ЛБВ с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением в переходных режимах работы ЭОС / Ю. Ю. Филин, С. П. Морев, Н. М. Коломийцева [и др.] // *Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ».* СПб, 30 мая – 3 июня 2022 г. – С.128 – 132.

Статья поступила 19 декабря 2022 г.

УДК 621.372.412:621.386.624

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОТРУБНОГО МНОГОЗАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ МОЩНОГО ДВУХТРУБНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА С-ДИАПАЗОНА С УВЕЛИЧЕННОЙ В 2 РАЗА ПОЛОСОЙ РАБОЧИХ ЧАСТОТ

Д. С. Моисеев, А. Н. Юнаков, С. В. Евсеев

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

Приводятся результаты исследования конструкции двухтрубной резонаторной системы мощного широкополосного многолучевого клистрона и его выходной системы с выходным активным двухзазорным резонатором, обеспечивающим полосу рабочих частот 7,4 % и выходную среднюю мощность более 15 кВт.

КС: многолучевой клистрон, двухзазорный резонатор, резонаторная система на втором виде колебаний, полоса рабочих частот, КПД

INVESTIGATION OF A MULTI-TUBE MULTI-GAP RESONATOR FOR A HIGH-POWER TWO-TUBE MULTIPLE-BEAM C-BAND KLYSTRON WITH A DOUBLE INCREASED OPERATING FREQUENCY BAND

D. S. Moiseev, A. N. Yunakov, S. V. Evseev

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

The results of studying the design of a two-tube resonator system of a high-power wide-band multiple-beam klystron and its output system with an output active two-gap resonator, providing an operating frequency band of 7.4 % and an output average power of more than 15 kW are presented.

Keywords: multiple-beam klystron, two-gap resonator, resonator system on the second mode of oscillation, operating frequency band, efficiency

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные мощные многолучевые клистроны (МЛК) применяются в основном в качестве оконечных усилителей СВЧ-мощности передающих каскадов РЛС. Расширение полосы рабочих частот клистрона позволяет повысить электромагнитную совместимость станций, их помехозащищенность, что особенно важно в условиях современных радиоэлектронных средств, насыщенных множеством электромагнитных излучателей [1].

В данной работе показаны основные результаты исследования возможности модернизации многолучевого импульсного клистрона, полоса рабочих частот которого перекрывается двумя литерами. Модернизация данного клистрона заключается в замене двух литер прибора однолитерным с увеличением полосы рабочих частот до 7,4 % и сохранением уровней выходной мощности и коэффициента усиления (табл. 1).

Решение данной задачи заключается в математическом моделировании физических процессов электродинамической системы клистрона.

Таблица 1

Параметры прибора-прототипа и модернизированного клистрона

Параметр	Прибор-прототип	Требуемый результат
Длина волны, см	7,4	7,4
Выходная импульсная мощность, кВт	>90	>90
Выходная средняя мощность, кВт	>15	>15
Минимальный КПД, %	28	28
Полоса рабочих частот, %	4,5	7,4
Коэффициент усиления, дБ	>40	>40
Напряжение катода, кВ	13 – 15	13 – 15
Выходной резонатор	Одноззорный двухтрубный	Двухззорный двухтрубный

Для сохранения высокого уровня выходной мощности и КПД при расширении полосы рабочих частот проведено объединение двухтрубных и двухззорных резонаторов в единую конструкцию (рис. 1).

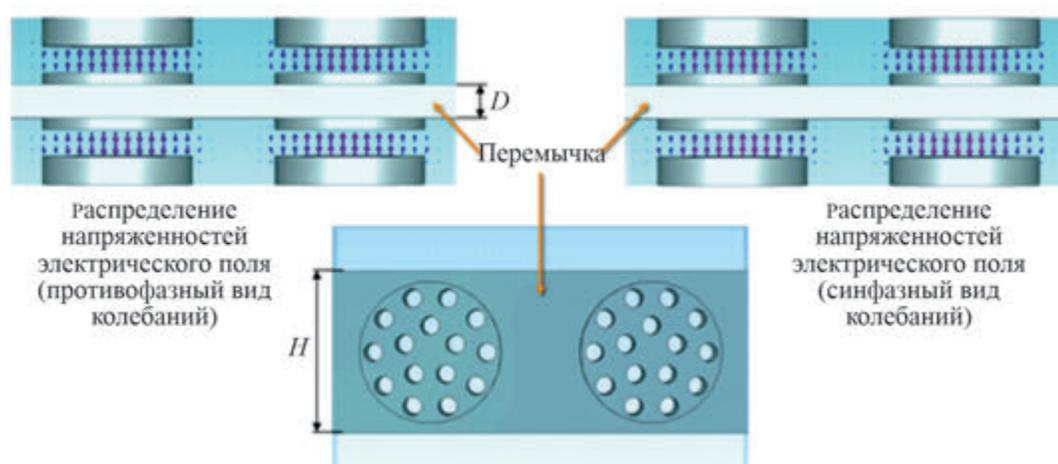


Рис. 1. Конструкция двухззорного двухтрубного резонатора для мощного широкополосного резонатора

Вместе с преимуществами данного вида резонаторов имеются и недостатки. В частности, сложность технологии изготовления, необходимость отвода тепла от центральной перемычки, наличие паразитных колебаний.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ РЕЗОНАТОРНОЙ СИСТЕМЫ МОЩНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО КЛИСТРОНА

В рамках проведенных исследований была оптимизирована конструкция электродинамической системы клистрона, в которой используются резонаторы на втором виде колебаний. На рис. 2 и 3 приведены структурная схема девятирезонаторной системы с параметрами каждого из

резонаторов (их нагруженные и собственные добротности, характеристические сопротивления, длины дрейфов) и расстройка частот соответственно. На рис. 4 приведена зависимость КПД и коэффициента усиления K_y от частоты.

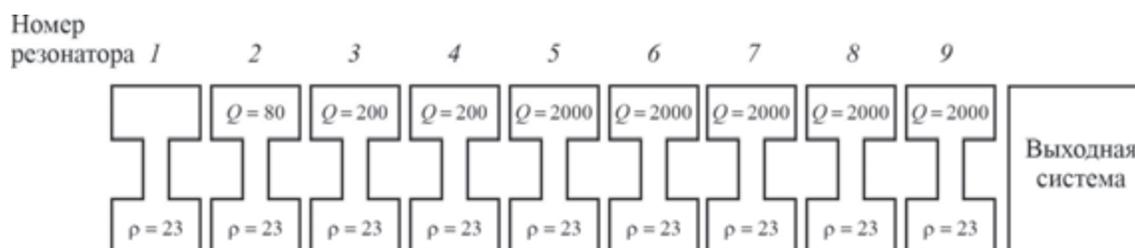


Рис. 2. Структурная схема резонаторной системы прибора-прототипа



Рис. 3. Расстройка частот резонаторов группирователя клистрона относительно центральной частоты f_0 рабочей полосы частот

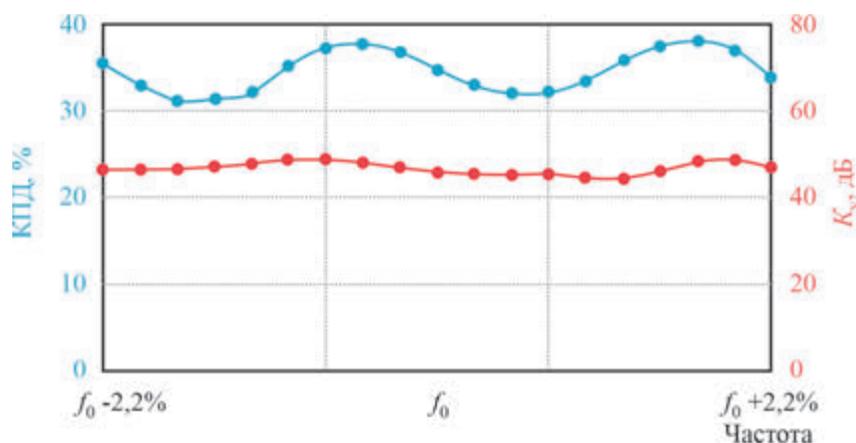


Рис. 4. Выходные характеристики прибора-прототипа в полосе рабочих частот 4,4 % (эксперимент)

Частоты резонаторов настроены по классической схеме 1–2–3–4... (при которой частота каждого последующего резонатора увеличивается с его номером, четыре первых резонатора находятся в полосе, четыре – удалены за нее, последний – настроен на центральную частоту). Подобная настройка позволяет получить максимальный КПД 31...38 % и коэффициент усиления 45...50 дБ (см. рис. 4).

На рис. 5...8 представлены в виде схемы результаты расчета модернизированной резонаторной системы с выходным двухзакорным резонатором и полосой 7,4 %.

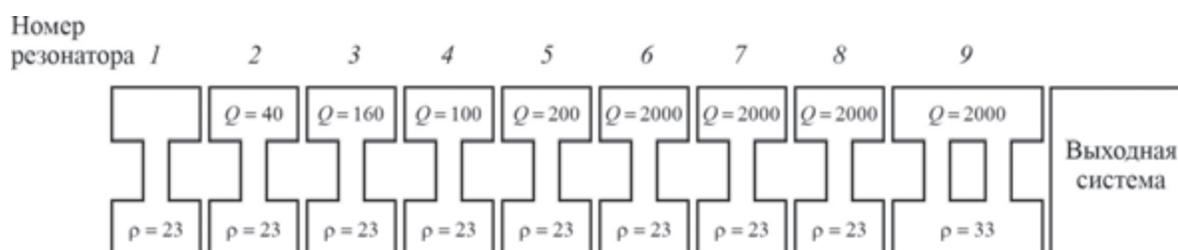


Рис. 5. Структурная схема модернизированной резонаторной системы с выходным двухзворным резонатором клистрона и полосой рабочих частот 7,4 %



Рис. 6. Настройка частот модернизированной резонаторной системы с выходным двухзворным резонатором и полосой 7,4 %

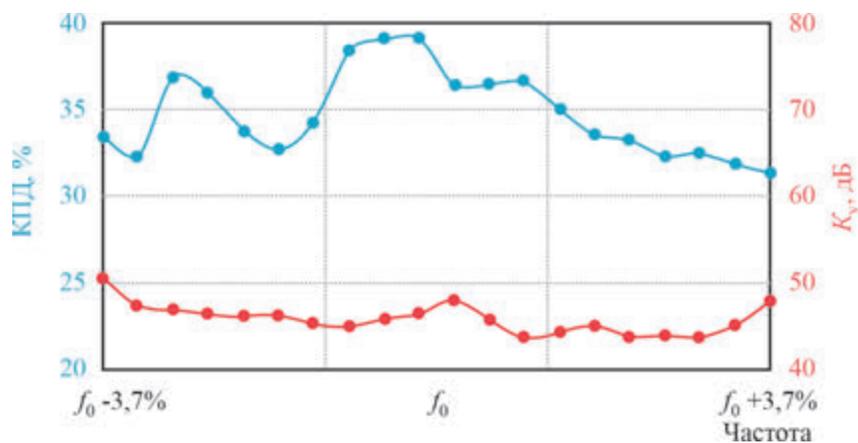


Рис. 7. Рассчитанные выходные характеристики прибора с модернизированной резонаторной системой в полосе рабочих частот 7,4 %

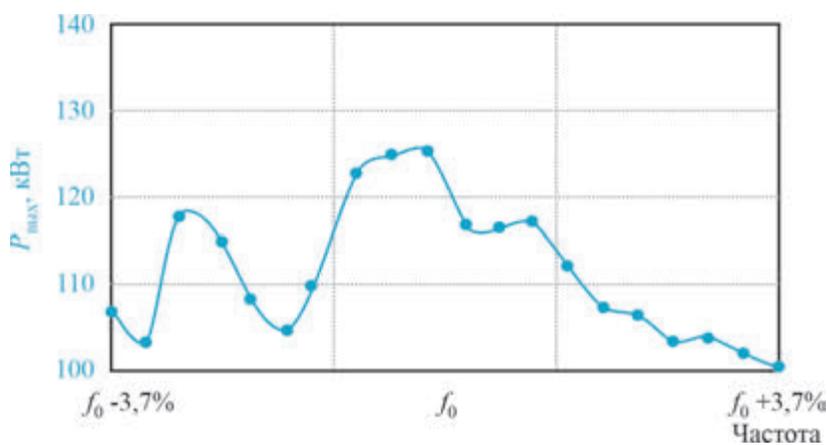


Рис. 8. Зависимость выходной мощности от частоты прибора с модернизированной резонаторной системой в полосе рабочих частот 7,4 %

На рис. 6 показана схема настройки модернизированной резонаторной системы: частоты резонаторов 1...5, расположенных в полосе рабочих частот, определяют усиление в приборе. Основное отличие от схемы изделия-прототипа (см. рис. 2) – введение в линейный группирователь 5 резонатора при сохранении требуемого уровня усиления прибора и числа резонаторов. Перестройка частот резонаторов, изменение длин труб дрейфа, а также замена однозазорного выходного резонатора на двухзазорный позволили увеличить полосу рабочих частот клистрона с сохранением таких параметров, как КПД и коэффициент усиления.

Применяемый в данном случае выходной двухзазорный резонатор обладает увеличенным по сравнению с однозазорным резонатором характеристическим сопротивлением и соответственно значением произведения ρM^2 , где ρ – характеристическое сопротивление; M – коэффициент взаимодействия электронного потока с СВЧ-зазором [2]. Так как для оптимального взаимодействия сгруппированного электронного потока с высокочастотным полем выходного резонатора необходимо выдержать определенное соотношение величин $\rho(Q_n/R_0)$, где Q_n – нагруженная добротность выходного резонатора, определяющая ширину полосы усиливаемых частот группирователя клистрона; R_0 – сопротивление электронного пучка, то при увеличении ρ можно уменьшить Q_n и тем самым, сохранив КПД, расширить полосу усиления клистрона [3].

3. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫХОДНОЙ СИСТЕМЫ МОЩНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО КЛИСТРОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО ДВУХАЗОРНОГО ДВУХТРУБНОГО РЕЗОНАТОРА

Одновременно с расчетом резонаторной системы прибора был проведен расчет выходного двухзазорного резонатора. В качестве предварительного исследования была подобрана оптимальная конструкция резонатора с точки зрения максимального характеристического сопротивления, неравномерности его распределения по диаметру пролетных труб, а также наилучшего разделения частоты рабочего вида колебаний от паразитных. В соответствии с этим проведено исследование влияния высоты окна связи ненагруженного двухзазорного резонатора (рис. 9) на его основные параметры. В мощных МЛК используются перемычки, соединенные с двумя или тремя стенками резонатора, образующими при этом одно или два окна связи между зазорами соответственно.

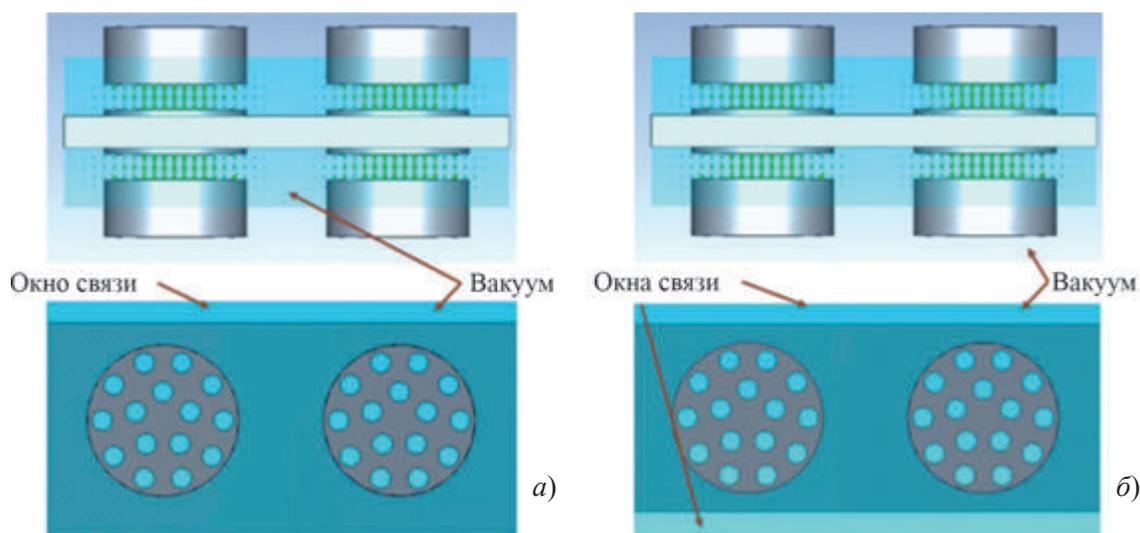


Рис. 9. Конструкции ненагруженного выходного двухзазорного резонатора с одним (а) и с двумя (б) окнами связи

Для двухззорного резонатора с двумя окнами связи, имеющими ширину перемычки 5 мм и высоту окон связи 3,5 мм, проведен расчет распределения характеристического сопротивления в каждом канале: среднее характеристическое сопротивление $\rho_{cp} = 31,6$ Ом; неравномерность распределения характеристического сопротивления по диаметрам пролетных труб $\rho_{max}/\rho_{min} = 1,425$ (рис. 10).

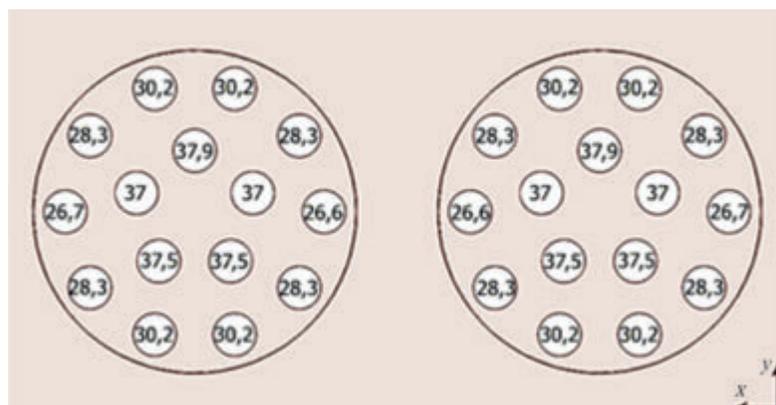


Рис. 10. Распределение характеристического сопротивления по диаметрам пролетных труб ненагруженного выходного двухззорного резонатора

Далее был проведен расчет выходной фильтровой системы (рис. 11). Выходная система представляет собой выходной активный, два пассивных резонатора, окна связи между ними и элементы настройки частот. Расчет характеристического сопротивления каждого пролетного канала представлен на рис. 12. Добавление дополнительной полости способствовало незначительному увеличению неравномерности распределения характеристического сопротивления, при этом сама величина ρ_{cp} также уменьшилась по сравнению с ненагруженной конструкцией: $\rho_{cp} = 30,1$ Ом; $\rho_{max}/\rho_{min} = 1,496$.

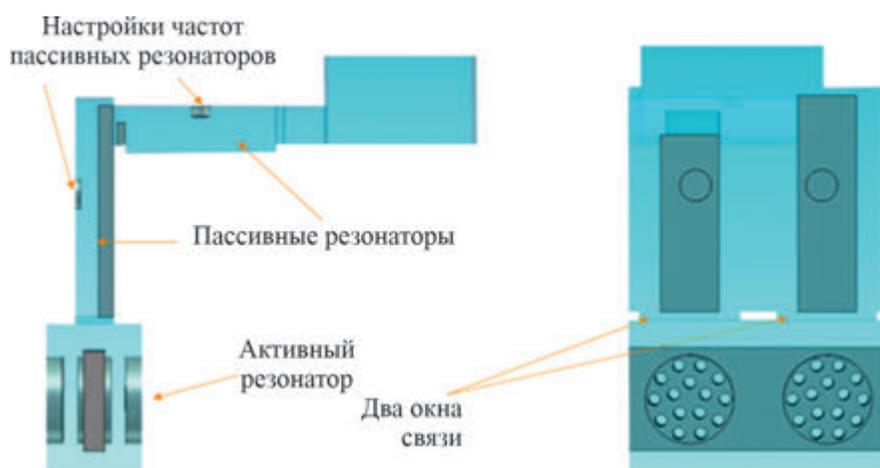


Рис. 11. Вариант выходной фильтровой системы с двухззорным двухтрубным активным резонатором

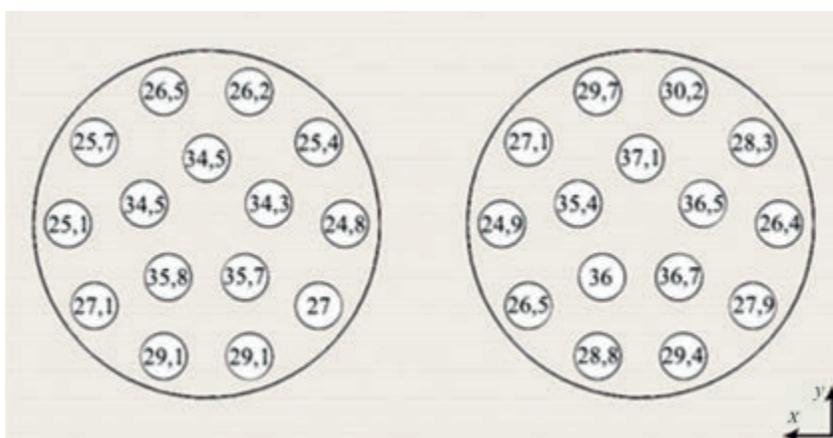


Рис. 12. Неравномерность полей нагруженного выходного двухзакорного резонатора

В связи с увеличением полосы рабочих частот до 7,4% появилась необходимость в модернизации выходной системы (рис. 13). Изменений коснулась геометрия пассивных резонаторов, диафрагм в окнах связи между резонаторами. Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика выходной системы представлена на рис. 14.

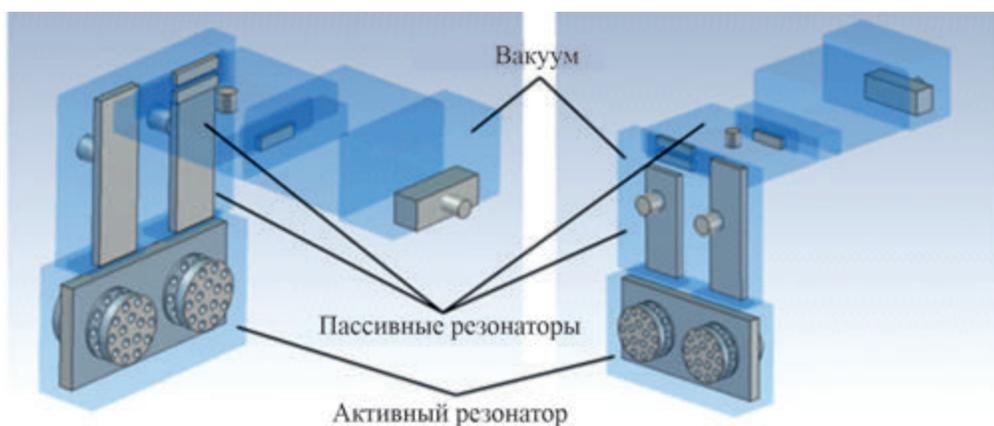


Рис. 13. Модернизированная выходная фильтровая система с двухзакорным выходным активным резонатором

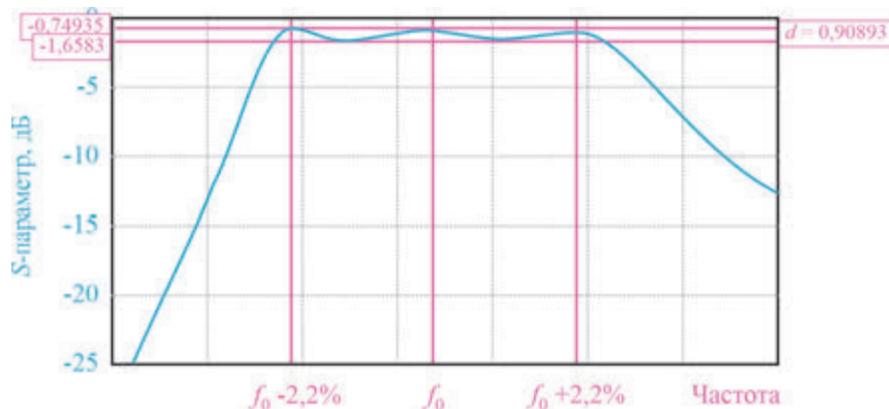


Рис. 14. АЧХ модернизированной выходной фильтровой системы

Проведенный расчет АЧХ в программе CST Microwave Studio с расширенным диапазоном частот (рис. 15) позволил определить местонахождение ближайшего паразитного вида, который отдален от крайней рабочей точки на 5,7 % в длинноволновую сторону. Данный вид колебаний локализуется в центре окна связи между двумя полостями активного резонатора (рис. 16). В дальнейшем планируется изучение возможности смещения этого «паразита» еще дальше в длинноволновую сторону за счет изменения конструкции диафрагмы между первым и вторым пассивными резонаторами.

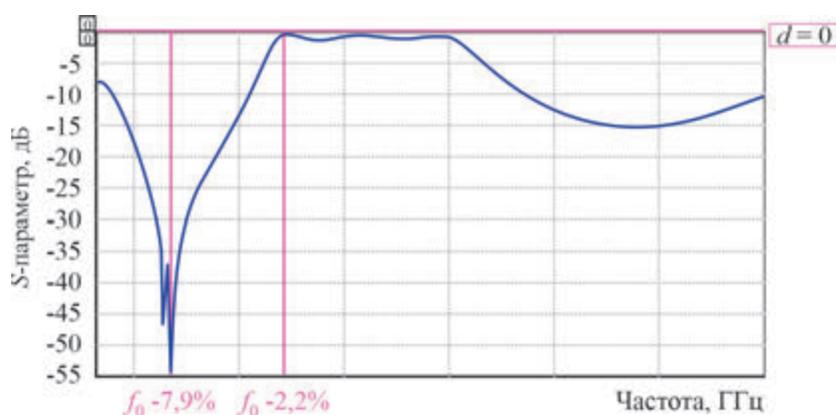


Рис. 15. АЧХ модернизированной выходной фильтровой системы в уменьшенном масштабе с видимым ближайшим паразитным колебанием

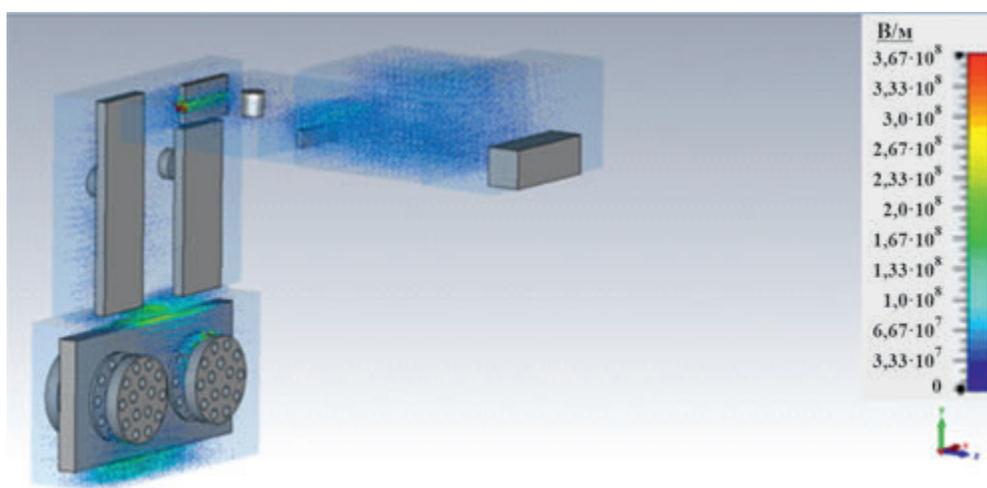


Рис. 16. Распределение напряженности электрического поля паразитного вида колебаний в выходной фильтровой системе

Параметры клистрона с модернизированным группирователем и выходной фильтровой системой приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры клистрона с модернизированным группирователем
и выходной фильтровой системой**

Параметр	Результат расчета	Требования к параметрам прибора-прототипа
Выходная импульсная мощность, кВт	105 – 130	>90
Рабочая полоса частот, %	7,4	4,4
Минимальный КПД, %	33,1	28
Коэффициент усиления, дБ	>40	>40
Перепад входной мощности, дБ	1,6 – 4,6	1 – 5

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование выходного двухзачорного резонатора позволило определить геометрию центральной перемычки, при которой возможно достижение необходимого уровня разделения частот различных видов колебаний, высокого значения характеристического сопротивления (среднее характеристическое сопротивление $\rho_{cp} = 30,1$ Ом) и минимизации неравномерности его распределения по диаметру пролетной трубы ($\rho_{max}/\rho_{min} = 1,496$). При этом удалось обеспечить возможность жидкостного охлаждения центральной перемычки.

Предложена конструкция выходной фильтровой системы, способная обеспечить АЧХ путем подбора частот, добротностей и коэффициентов связи её элементов (за счёт изменения геометрических размеров и оптимальных размеров диафрагм).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Евсеев, С. В.** Мощный широкополосный импульсный клистрон с равномерной амплитудно-частотной характеристикой / С. В. Евсеев, В. И. Пугнин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. Труды юбилейной конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток». Часть II. – 2013. – № 4 (519). – С. 59 – 63.
2. **Юнаков, А. Н.** Проблемы и пути создания мощных широкополосных многолучевых клистронов в средней части сантиметрового диапазона длин волн / А. Н. Юнаков, В. И. Пугнин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. Труды юбилейной конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток». Часть II. – 2013. – № 4 (519). – С. 64 – 67.
3. **Комаров, Д. А.** Проблемы ограничения полосы рабочих частот и КПД СВЧ-усилителей и методы их преодоления / Д. А. Комаров, А. В. Фетисова, С. П. Морев // Научная сессия «МИФИ». – 2009. – Т. 1.

Статья поступила 8 декабря 2022 г.

УДК 621.385.624

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ КЛИСТРОН *Ku*-ДИАПАЗОНА

А. Д. Калачев^{1,2}, В. А. Царев^{1,2}

¹АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

²СГТУ им. Гагарина Ю. А., г. Саратов

Приводятся результаты численного моделирования малогабаритного импульсного 19-лучевого клистрона *Ku*-диапазона частот с выходной импульсной мощностью не менее 800 Вт и перепадом этой мощности не более 1,5 дБ. В состав группирователя этого прибора входят четыре одноззорных и один кластерный двухззорный призматический резонатор. Отбор энергии от модулированного электронного потока осуществляется с помощью кластерного трехззорного призматического резонатора. Клистрон работает при ускоряющем напряжении 3 кВ и общем токе луча 0,8 А. Он имеет коэффициент усиления около 34 дБ в полосе усиления не менее 300 МГц.

КС: многолучевой клистрон, многоззорный резонатор, противофазный и синфазный виды колебаний, щель связи, численное моделирование

A *Ku*-BAND BROAD-BAND MINIATURE MULTIPLE-BEAM KLYSTRON

A. D. Kalachev^{1,2}, V. A. Tsarev^{1,2}

¹JSC «RPE «Almaz», Saratov

²SSTU named after Gagarin Yu. A., Saratov

The results of numerical simulation of a *Ku*-band miniature pulsed 19-beam klystron with an output pulsed power of at least 800 W and not more than 1.5 dB pass band flatness are presented. The buncher of this device includes four single-gap resonators and one cluster two-gap prismatic resonator. Energy extraction from the modulated electron beam is carried out using a cluster three-gap prismatic resonator. The klystron operates at a beam accelerating voltage of 3 kV and a total beam current of 0.8 A. It has a gain factor of about 34 dB in a bandwidth of at least 300 MHz.

Keywords: multiple-beam klystron, multiple-gap cavity, antiphase and inphase modes, coupling aperture, numerical modeling

1. ВВЕДЕНИЕ

Малогабаритные многолучевые клистроны (ММЛК) уже не одно десятилетие прочно занимают лидирующие позиции среди существующих усилителей СВЧ-мощности для выходных каскадов радиолокационных систем различного назначения, что обусловлено целым рядом их преимуществ.

Во-первых, такие многолучевые клистроны имеют малые габариты и массу (от 0,5 до 1,3 кг). Во-вторых, для их работы требуются низкие питающие напряжения (от 2 до 5,5 кВ), в связи с чем отсутствует необходимость использования громоздких и сложных источников питания. ММЛК обладают высоким уровнем выходной импульсной мощности (от 300 до 1200 Вт), коэффициентом усиления от 30 до 40 дБ и широкой полосой усиливаемых частот (от 100 до 300 МГц).

Проводимые разработки приборов данного типа направлены на продвижение в диапазон миллиметровых длин волн, увеличение выходной мощности и ширины полосы рабочих частот без увеличения габаритов и массы прибора-аналога, конструкция которого описана в работе [2]. Широкая полоса усиливаемых частот в этом приборе (около 300 МГц) была получена с помощью трехзвенных фильтровых систем, расположенных как на входе, так и на выходе прибора. Максимальная выходная импульсная мощность этого прибора – около 680 Вт. Целью настоящей работы является разработка многолучевого клистрона с выходной импульсной мощностью не менее 800 Вт в полосе частот 300 МГц и перепадом выходной мощности не более 1,5 дБ.

2. КОНСТРУКЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Конструкция электродинамической системы разрабатываемого прибора показана на рис. 1. Она включает в себя девять призматических резонаторов. В состав линейной части группирователя входят три первых однозорных резонатора. В состав нелинейной части группирователя входят кластерный двухзорный резонатор, состоящий из двух однозорных резонаторов, электромагнитная связь между которыми осуществляется с помощью щели, выполненной в разделяющей их центральной перегородке [3], [4], и однозорный предвыходной резонатор. Выходная электродинамическая система образована кластером, состоящим из трех однозорных резонаторов. В качестве рабочего во всех кластерных резонаторах был выбран синфазный вид колебаний.

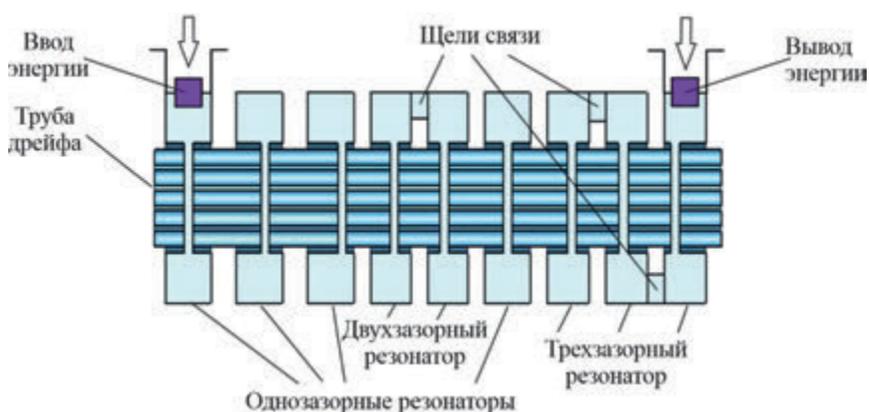


Рис. 1. Конструкция резонансной системы ММЛК

Все однозорные резонаторы конструктивно одинаковы. Характерные размеры этих резонаторов приведены на рис. 2.

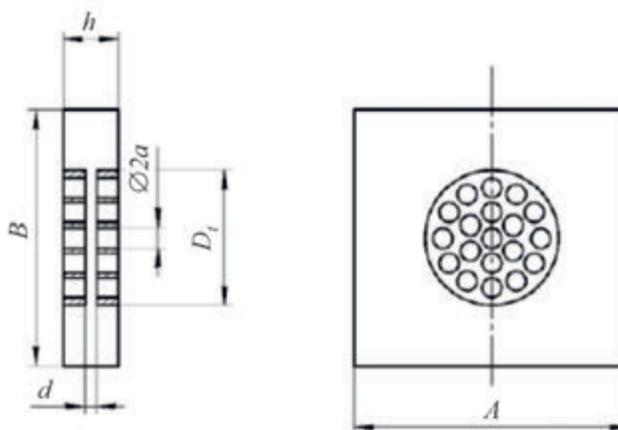


Рис. 2. Конструкция однозорного резонатора

Корпус резонатора представляет собой прямую прямоугольную призму с размерами A, B, h . Величина бессеточного зазора d определяется расстоянием между торцами пролетных труб, имеющих относительный внешний диаметр $D_l/\lambda_0 = 0,198$.

В пролетных трубах было выполнено девятнадцать пролетных каналов с относительным радиусом $a/\lambda_0 = 0,014$, где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны, соответствующая центральной частоте полосы усиления, м; c – скорость света, м/с; f_0 – центральная частота полосы усиления, Гц.

Размеры щелей связи, длины зазоров d и размеры прямоугольного корпуса в ходе проведенных численных расчетов в программе электродинамического трехмерного моделирования СВЧ-структур CST STUDIO SUITE [5] варьировались, исходя из условия настройки конкретного резонатора на заданную рабочую частоту, отвечающего получению наиболее равномерной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе частот усиления.

Электродинамические и электронные параметры резонаторов определялись с помощью следующих соотношений [6]:

Собственная добротность

$$Q_0 = \omega_0 \frac{W_{\text{зап}}}{P_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая частота исследуемого вида колебаний; $W_{\text{зап}}$ – электромагнитная энергия, запасенная внутри резонатора; $P_{\text{п}}$ – средняя за период колебаний потеря мощности на его стенках.

Характеристическое сопротивление

$$\rho = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{max}}^2}{\omega_0 W_{\text{зап}}}, \quad (2)$$

где U_{max} – пиковое напряжение в зазоре резонатора, которое в общем случае определяется интегралом от продольного электрического поля вдоль оси резонатора,

$$U_{\text{max}} = \int_z E_z(r, z) dz,$$

$E_z(r, z)$ – функция распределения продольной компоненты напряженности электрического поля, измеренная на уровне радиуса пролетного канала $r = a$.

Коэффициент эффективности взаимодействия вычисляется как

$$M = \frac{\sqrt{I_0^2(\gamma b) - I_1^2(\gamma b)}}{I_0(\gamma a)} M_z, \quad (3)$$

где $I_0(\gamma b), I_0(\gamma a), I_1(\gamma b)$ – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков от приведенных характерных радиальных размеров; $\gamma = \sqrt{(\beta_e^2 - k^2)}$ – радиальная электронная постоянная распространения; $\beta_e = 2\pi c/(\lambda_0 v_0)$ – продольная постоянная распространения электронного потока; v_0 – скорость электронного потока, м/с; $k = \omega_0/c$ – волновое число; b – радиус электронного потока; a – радиус пролетного канала.

$$M_z = \frac{M^+ + M^-}{2},$$

где

$$M^+ = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E(a, z) e^{(\beta_e + \beta_g)z} dz}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(a, z) dz|}; \quad M^- = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E(a, z) e^{(\beta_e - \beta_g)z} dz}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(a, z) dz|};$$

$\beta_q = \omega_q/v_0$ – постоянная распространения редуцированной плазменной частоты; $\omega_q = R\omega_p$ – редуцированная плазменная частота; $\omega_p = \sqrt{e\rho_0/m\varepsilon_0}$ – собственная частота колебаний плазмы в безгранично широком электронном потоке; e/m – отношение заряда электрона к его массе; ρ_0 – плотность заряда; ε_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства; $R = \omega_q/\omega_p$ – параметр редукиции.

Величина относительной активной электронной проводимости рассчитывалась по формуле

$$\frac{G_e}{G_0} = -\frac{\beta_e}{2} M \frac{\partial M}{\partial \beta_e}; \quad (4)$$

где $G_0 = I_0/U_0$ – проводимость электронного потока по постоянному току; I_0 – сила тока электронного потока, А; U_0 – ускоряющее напряжение, В.

Предпоследний резонатор в группирователе прибора был выбран двухззорным. Его конструкция представлена на рис. 3.

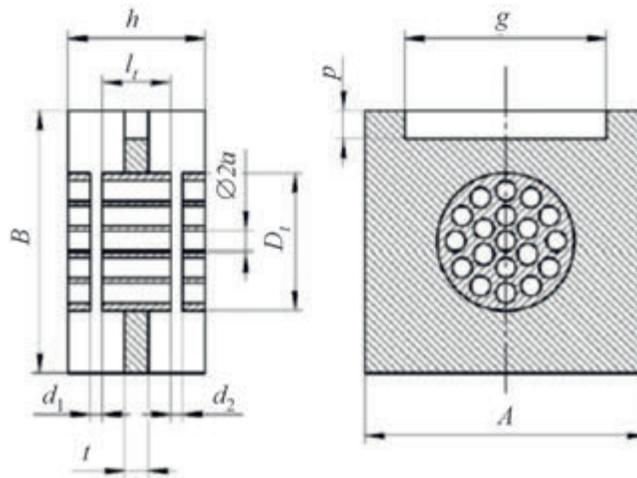


Рис. 3. Конструкция двухззорного резонатора

Этот резонатор представляет собой два электромагнитно связанных призматических одноззорных резонатора, выполненных в едином корпусе с размерами A , B , h . В каждом из этих резонаторов имеются бессеточные зазоры, имеющие длины $d_1 = d_2 = d$.

В [7] показано, что П-образная щель связи между резонаторами, выполненная в общей стенке, может обеспечить высокий коэффициент разделения частот рабочего синфазного вида колебаний и нерабочего (низкочастотного противофазного) вида колебаний. Поэтому в качестве элемента связи между резонаторами в кластерах был выбран частный случай П-образной щели, а именно: прямоугольная щель со следующими геометрическими размерами: g – длина щели, p – ширина, которые в ходе проведенных численных расчетов варьировались.

Геометрические размеры резонаторов выбирались, исходя из настройки системы связанных резонаторов на необходимую частоту. Причем расстояние между центрами зазоров этих резонаторов S определялось из соотношения:

$$\beta_e S = \beta_e (l_i + d) = 2\pi, \quad (5)$$

где l_i – длина пролетной трубы, м; d – длина зазора, м.

Распределение вектора напряженности электрического поля в продольном сечении и график

распределения нормированной продольной компоненты вектора напряженности электрического поля в центральном пролетном канале двухззорного резонатора приведены на рис. 4.

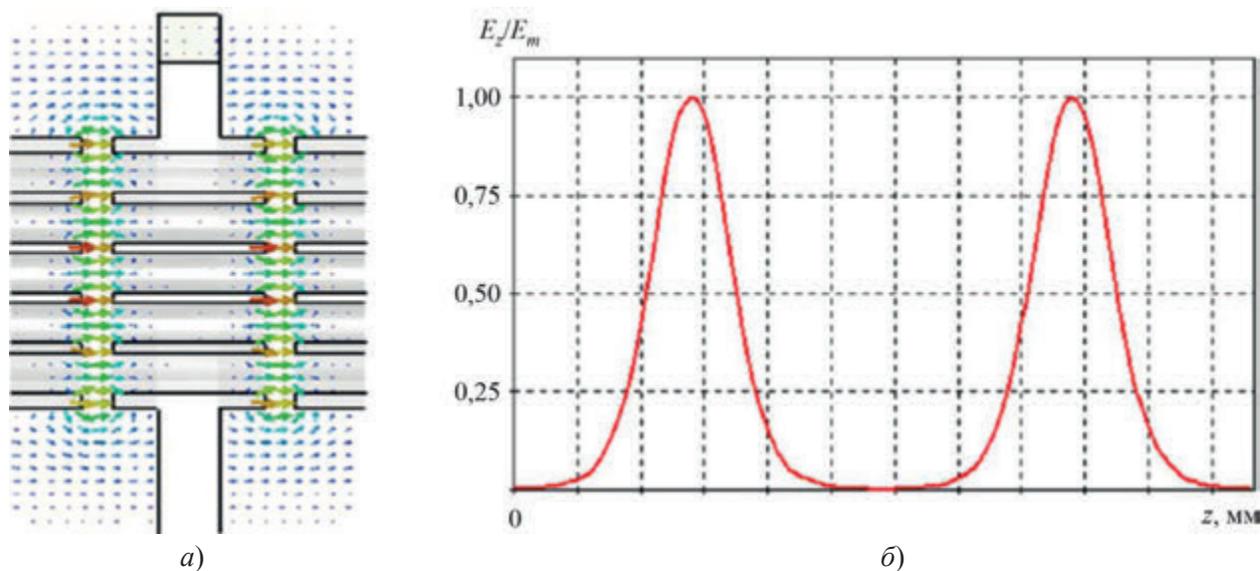


Рис. 4. Распределение вектора напряженности электрического поля в продольном сечении (а) и график распределения нормированной продольной компоненты вектора напряженности электрического поля в центральном пролетном канале двухззорного резонатора (б)

Зависимости коэффициента эффективности взаимодействия M и относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 противофазного и синфазного видов колебаний в двухззорном резонаторе от ускоряющего напряжения показаны на рис. 5.

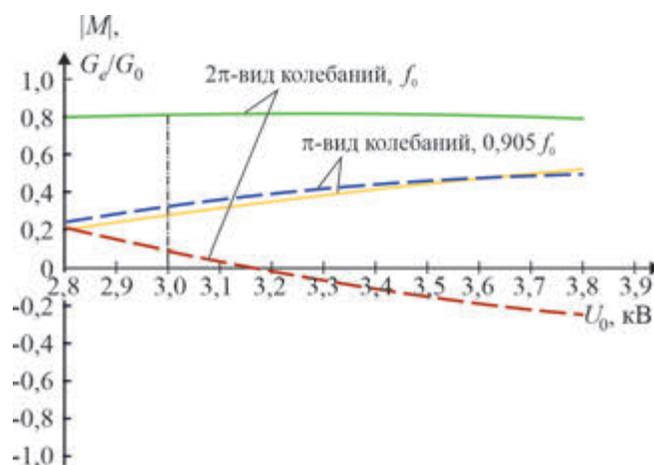


Рис. 5. Зависимости коэффициента эффективности взаимодействия M (—) и относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 (- - -) от ускоряющего напряжения U_0 в двухззорном резонаторе

Из рис. 5 видно, что значение относительной активной электронной проводимости на противофазном и синфазном видах колебаний положительное при выбранном ускоряющем напряжении $U_0 = 3$ кВ, т. е. самовозбуждение клистрона исключено.

Выходной резонатор представляет собой резонансную систему, состоящую из трех связанных

через прямоугольные щели связи одинаковых однозорных резонаторов. Бессеточные зазоры имеют одинаковую длину: $d_1 = d_2 = d_3 = d$ (рис. 6). Трубы дрейфа имеют относительный внешний диаметр $D_f/\lambda_0 = 0,198$. В пролетных трубах выполнены девятнадцать пролетных каналов с относительным радиусом $a/\lambda_0 = 0,014$.

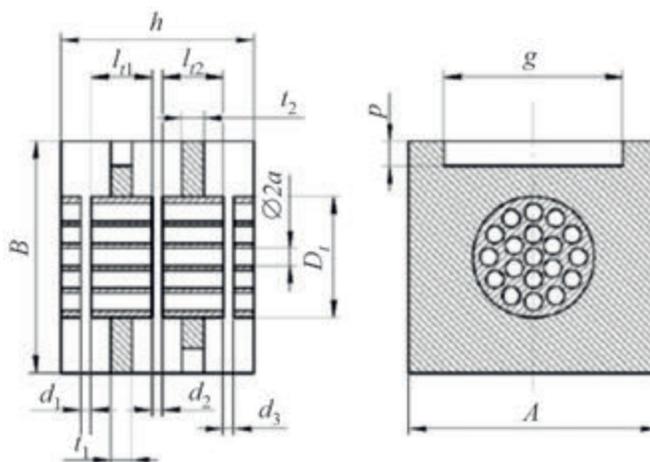


Рис. 6. Конструкция выходного резонатора

На рис. 7 приведены графики нормированной продольной компоненты вектора напряженности электрического поля в центральном пролетном канале и распределение вектора напряженности электрического поля в продольном сечении резонатора на рабочем и паразитных видах колебаний.

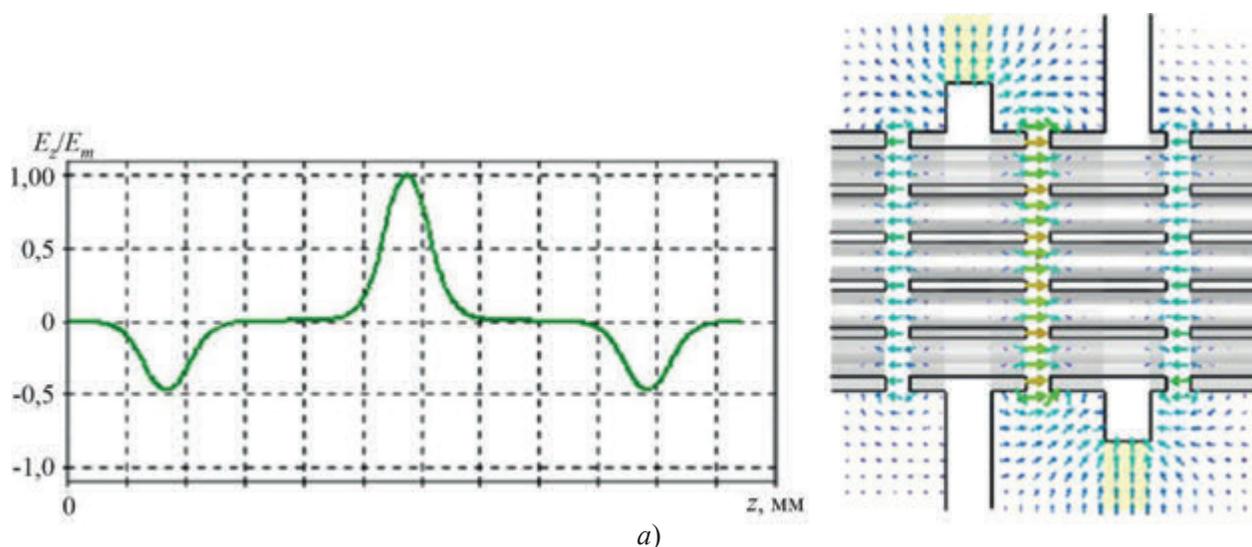


Рис. 7. Распределения нормированной продольной компоненты вектора напряженности электрического поля в центральном пролетном канале и распределение вектора напряженности электрического поля в продольном сечении выходного резонатора (см. также с. 40 и 41):

a – π -вид колебаний, $0,806f_0$

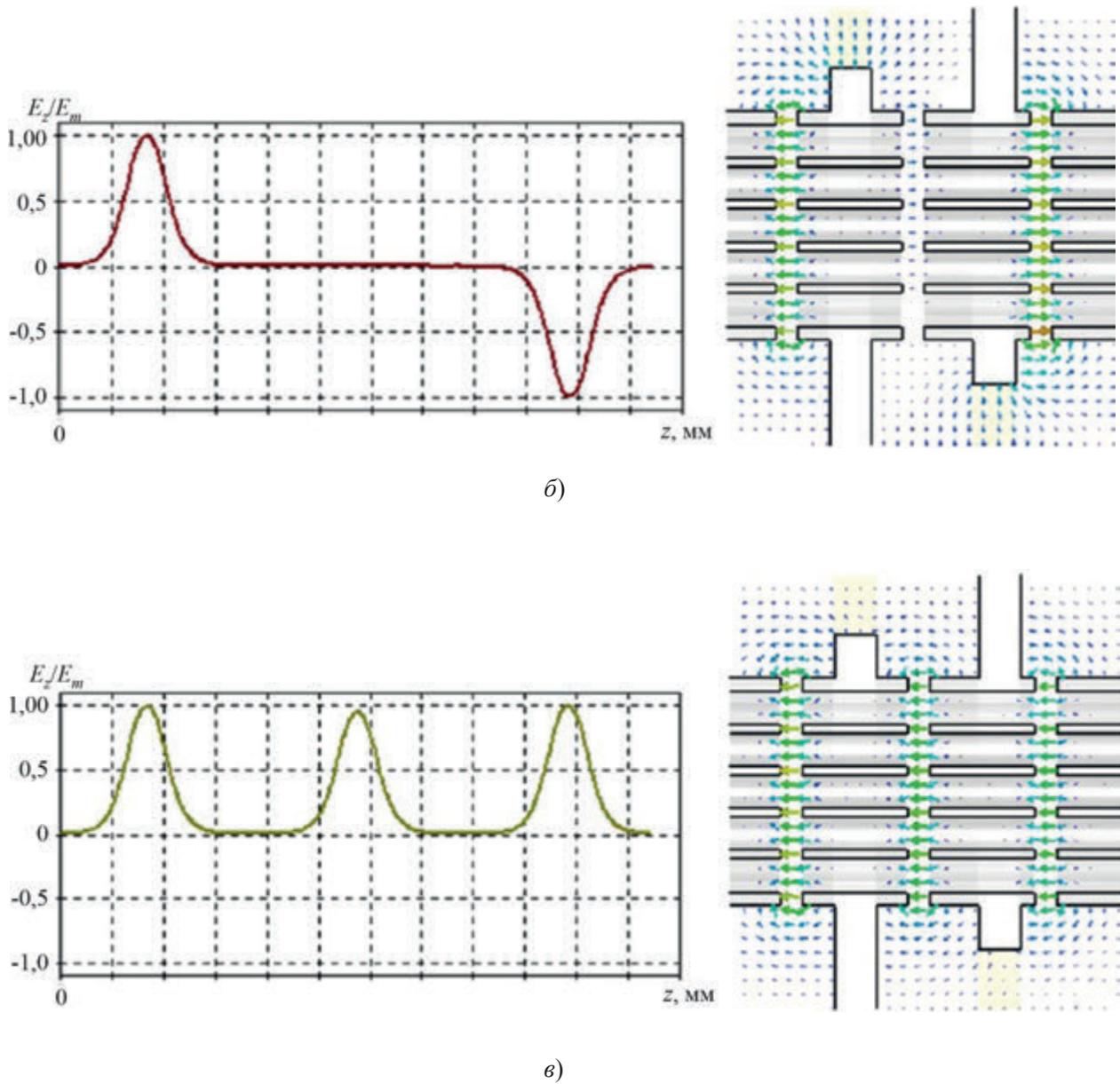


Рис. 7. Распределения нормированной продольной компоненты вектора напряженности электрического поля в центральном пролетном канале и распределение вектора напряженности электрического поля в продольном сечении выходного резонатора (см. также с. 41):

$\text{б} - \pi/2\text{-вид колебаний, } 0,931f_0; \text{ в} - 2\pi\text{-вид колебаний, } f_0$

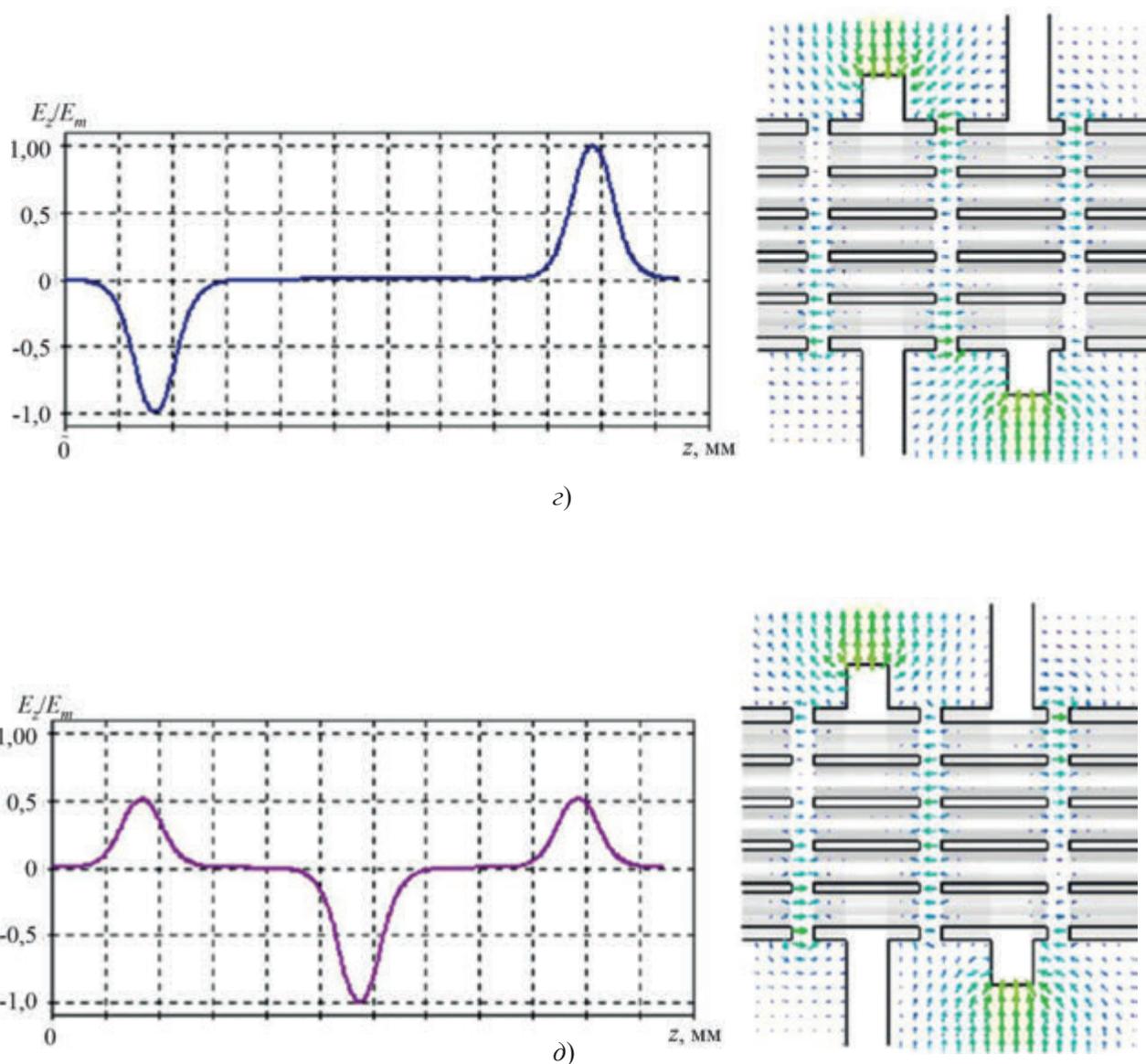


Рис. 7. Распределения нормированной продольной компоненты вектора напряженности электрического поля в центральном пролетном канале и распределение вектора напряженности электрического поля в продольном сечении выходного резонатора:

a – щелевой $\pi/2$ -вид колебаний, $1,85f_0$; b – щелевой π -вид колебаний, $2,035f_0$

Графики зависимостей коэффициента эффективности взаимодействия M и относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 синфазного (2π), противофазного (π) и $\pi/2$ -вида колебаний в выходном резонаторе от ускоряющего напряжения показаны на рис. 8 и 9.

Относительная активная электронная проводимость всех видов колебаний находится в области положительных значений при выбранном ускоряющем напряжении, что является необходимым условием обеспечения стабильной работы разрабатываемого усилительного прибора.

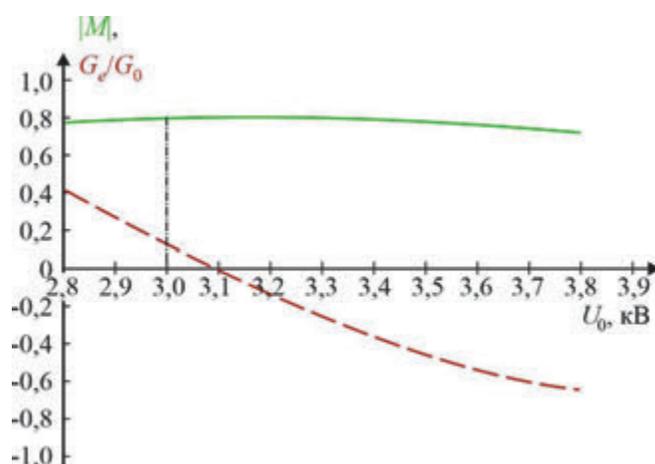


Рис. 8. Графики зависимостей коэффициента эффективности взаимодействия M и относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 от ускоряющего напряжения U_0 в выходном резонаторе на синфазном виде колебаний (2π -вид колебаний, f_0)

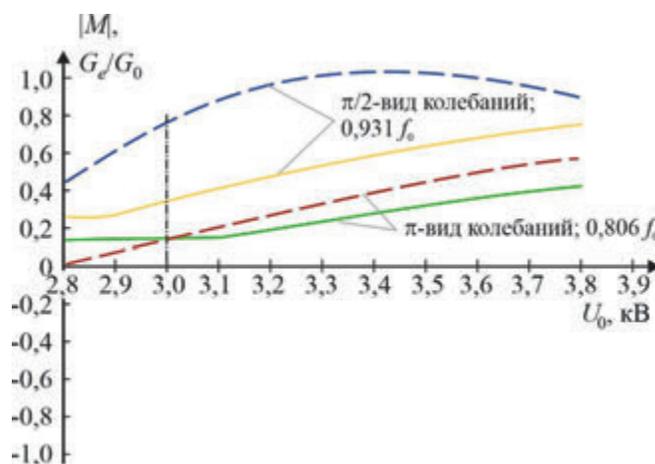


Рис. 9. Графики зависимостей коэффициента эффективности взаимодействия M (—) и относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 (- -) от ускоряющего напряжения U_0 в выходном резонаторе на видах колебаний π и $\pi/2$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ДИСКОВОЙ МОДЕЛИ КЛИСТРОНА

Расчет взаимодействия электронного потока с электрическим полем резонаторов проводился в программе AJDISK, основанной на дисковой модели клистрона [8]. Исходные данные для моделирования: ускоряющее напряжение $U_0 = 3$ кВ и ток катода $I_{\text{кат}} = 800$ мА. После проведения серии расчетов были найдены оптимальные значения расстроек резонаторов и длин труб дрейфа, которые позволяют получить необходимую величину выходной мощности с требуемым перепадом в заданной полосе частот. Значения электронных и электродинамических параметров резонаторов, полученные после оптимизации, приведены в таблице.

n	1	2	3	4	5	6
M	0,837	0,831	0,83	0,82	0,83	0,8
G_c/G_0	0,12	0,123	0,123	0,094	0,123	0,127
$\rho \cdot N$, Ом	570	570	570	1200	570	1700
Q_0	1200	1200	1200	1200	1200	1200
I_1/I_0	0	0,08	0,16	0,39	1,0	1,55
\check{U} , кВ	0	0,044	0,1	0,44	0,53	3,3

Примечание. N – количество пролетных каналов в трубах дрейфа;
 I_1/I_0 – нормированная амплитуда первой гармоники конвекционного тока;
 \check{U} – амплитуда высокочастотного напряжения в зазоре резонатора.

Результаты расчета фазовых траекторий и нормированной скорости дисков электронного потока, а также нормированных амплитуд гармоник конвекционного тока на центральной частоте рабочего диапазона представлены на рис. 10.

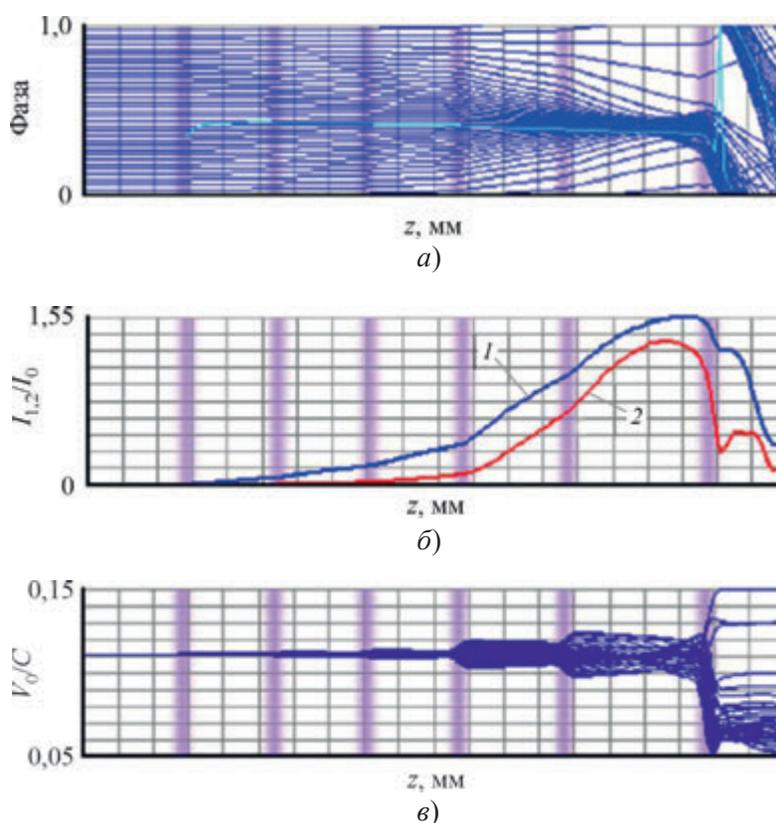


Рис. 10. Графики зависимостей от продольной координаты фазовых траекторий дисков электронного потока (а), нормированных амплитуд гармоник конвекционного тока (б) и нормированной скорости электронного потока (в):

1 – первой гармоники I_1 ; 2 – второй гармоники I_2

ММЛК имеет в полосе усиления электронный коэффициент полезного действия $\eta_{эл} = 36 \dots 52 \%$. АЧХ клистрона, полученная при оптимальной входной мощности, приведена на рис. 11.

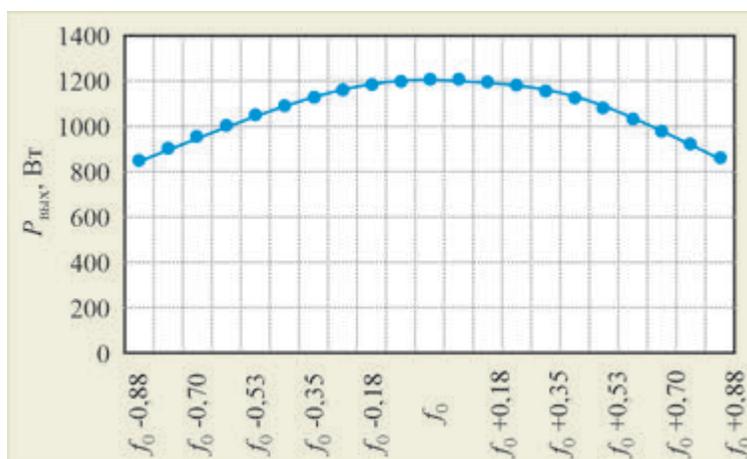


Рис. 11. Расчетная АЧХ ММЛК

Также был проведен расчет коэффициента усиления ММЛК в режиме с постоянной входной мощностью $P_{\text{вх}} = 20$ мВт (рис. 12). Рабочий диапазон частот клистрона при работе в таком режиме составляет 315 МГц, а неравномерность коэффициента усиления не превышает 1 дБ.

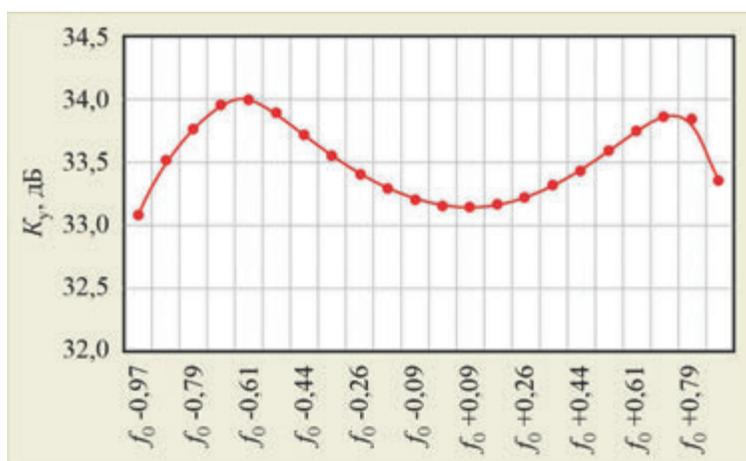


Рис. 12. График зависимости коэффициента усиления ММЛК от частоты при постоянной входной мощности $P_{\text{вх}} = 20$ мВт

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного численного моделирования в трехмерной программе CST STUDIO SUITE и одномерной программе AJDISK, основанной на дисковой модели клистрона, была разработана конструкция низковольтного ММЛК, работающего в Ku -диапазоне частот с выходной мощностью не менее 800 Вт. Рабочий диапазон частот прибора при эксплуатации в режиме насыщения составляет 300 МГц с перепадом выходной мощности не более 1,5 дБ. Возможна также работа клистрона в линейном режиме с постоянной входной мощностью в полосе усиливаемых частот 315 МГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Закурдаев, А. Д.** Мощные малогабаритные и миниатюрные многолучевые клистроны для бортовых РЛС / А. Д. Закурдаев // Радиотехника. – 2006. – № 3. – С. 31 – 33.
2. **Царев, В. А.** Улучшение выходных параметров многолучевого усилительного импульсного малогабаритного клистрона Ku -диапазона длин волн / В. А. Царев, И. О. Чигуров, П. Д. Шалаев // Радиотехника. – 2015. – № 7. – С. 41– 44.
3. **Zhang, H.** The circuit design and particle-in-cell simulation for a Ka -band extended interaction klystron / H. Zhang, D. Zhao, J. Luo // Conference: 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz waves (IRMMW-THz). Hong Kong, 23-29 aug. 2015 / CUHK. – Hong Kong, 2015. – P. 1 – 2.
4. **Symons, R. S.** The linear theory of the Clustered-Cavity Klystron / R. S. Symons, R. M. Vaughan // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1994. – Vol. 22, No 5. – P. 713 – 718.
5. **Курушин, А. А.** Школа проектирования СВЧ-устройств в CST STUDIO SUITE / А. А. Курушин. – М.: One-Book, 2014. – 433 с.
6. **Wessel Berg, T.** A general theory of klystrons with arbitrary, extended interaction fields // Technical Report, Stanford Microwave Laboratory Report No 376. – March, 1957.
7. **Калачев, А. Д.** Исследование влияния формы и размеров щели связи на электродинамические характеристики двухзорного щелевого резонатора миниатюрного многолучевого клистрона K -диапазона / А. Д. Калачев, В. А. Царев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3 (546). – С. 51 – 57.
8. Sheet beam klystron simulations using AJDISK / A. J. Jensen [et al.] // Proc. IEEE 7th. IVEC Conf. Monterey, Monterey, Apr., 2006. – P. 489 – 490.

Статья поступила 25 января 2023 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.049.776.029.64

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГИБРИДНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГУН СВЧ-ДИАПАЗОНА

И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Н. А. Фёдоров, Е. В. Медянкина

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

Сообщается о модернизации конструкции гибридной интегральной схемы путём размещения части проводников топологического рисунка металлизации многослойной печатной платы, соединяющих коаксиальный выход диэлектрического резонатора с управляющим и генераторным компонентами, на торцевой поверхности коаксиального диэлектрического резонатора. Такая модернизация позволяет уменьшить площадь платы генератора, за счёт этого снизить паразитные ёмкости и индуктивности платы, уменьшить размеры и массу металлического корпуса и платы, а значит, улучшить электрические и массогабаритные характеристики генератора.

КС: многослойная печатная плата; генератор, управляемый напряжением; коаксиальный диэлектрический резонатор, ёмкостные связи, управляющий компонент, генераторный компонент

IMPROVING A MICROWAVE VCO HYBRID INTEGRATED CIRCUIT DESIGN

I. V. Goryunov, V. A. Iovdalskiy, N. A. Fedorov, E. V. Medyankova

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

The article presents the improvement of a hybrid integrated circuit design by arranging part of the conductors of the topological metallization pattern of a multilayer printed circuit board connecting the coaxial output of the dielectric resonator with the control and generator components on the end surface of the coaxial dielectric resonator. Such modernization makes it possible to reduce the area of the generator board, thereby reducing the board parasitic capacitances and inductances, to reduce the weight and size of the metal case and the board, and so to improve the electrical and weight and size characteristics of the generator.

Keywords: multilayer printed circuit board, voltage-controlled oscillator, coaxial dielectric resonator, capacitive coupling, control component, generator component

1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянное ужесточение требований к характеристикам РЭА СВЧ-диапазона, предназначенной для бортовых систем специального и народнохозяйственного назначения, заставляет специалистов искать новые эффективные технические решения для достижения более высоких электрических и массогабаритных характеристик. В составе большого количества таких систем используются генераторы, управляемые напряжением (ГУН). Основным конструкторско-технологическим вариантом создания ГУН СВЧ-диапазона по-прежнему является гибридно-

интегральное исполнение с применением коаксиальных диэлектрических резонаторов. Поэтому модернизации конструкции гибридных интегральных схем (ГИС) ГУН СВЧ-диапазона уделяется большое внимание [1–5].

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

Современные генераторные модули выполняются с использованием многослойных печатных плат (МПП) с топологическим рисунком металлизации проводников по крайней мере на одной из сторон каждого диэлектрического слоя МПП [1] и экранной заземляющей металлизацией на обратной стороне нижнего диэлектрического слоя. Навесные компоненты, в том числе коаксиальный диэлектрический резонатор (КДР), расположены на лицевой стороне верхнего диэлектрического слоя и соединены своими выводами с проводниками его топологического рисунка металлизации. Обратная сторона верхнего диэлектрического слоя МПП имеет экранную заземляющую металлизацию на части своей обратной стороны, занятой обработкой СВЧ-сигнала, в том числе ГУН с включённым в его схему КДР. МПП установлена на дно металлического корпуса с крышкой и отверстиями в углах для крепления его в аппаратуре и электрически соединена с ним. Критерием оптимальности конструкции выбрана величина среднеквадратичного отклонения фазового шума.

Однако такая конструкция имеет определённые недостатки, в частности высокие паразитные ёмкости в схеме формирования СВЧ-сигнала и низкие массогабаритные характеристики.

Для улучшения электрических и массогабаритных характеристик был применён метод, представленный в работе [3], который заключается в выполнении выборки на обратной стороне платы. Результаты успешного применения такой конструкции подробно изложены в работах [4, 5].

Вторая исследуемая конструкция генераторного модуля [2] имела аналогичное строение и, как следствие, высокие паразитные ёмкости в схеме формирования СВЧ-сигнала, что обуславливает низкие электрические и массогабаритные характеристики.

В работе [6] для улучшения электрических и массогабаритных характеристик в конструкции ГИС, представленной в [2], часть топологического рисунка металлизации ГУН, соединяющая активные генераторный и управляющий компоненты с коаксиальным выходом КДР, расположена на торцевой поверхности КДР, электрически соединена с плёночными проводниками топологического рисунка, расположенного на лицевой стороне верхнего диэлектрического слоя МПП, и имеет в своём составе ёмкостные связи. Причём ёмкостная связь между торцом плёночного проводника соединения генераторного компонента и коаксиальным выходом диэлектрического резонатора выполнена в виде зазора шириной от 0,14 до 0,18 мм, а ёмкостная связь между боковой стороной плёночного проводника соединения управляющего компонента и коаксиальным выходом диэлектрического резонатора выполнена в виде зазора шириной от 0,16 до 0,2 мм.

Расположение части топологического рисунка проводников ГУН, соединяющей активные генераторный и управляющий компоненты с коаксиальным выходом КДР, на торцевой поверхности КДР и наличие в её составе ёмкостных связей позволяет сократить площадь топологического рисунка многослойной платы, занимаемую ГИС, а значит, сократить паразитную ёмкость проводников и тем самым улучшить электрические характеристики. Кроме того, это позволяет уменьшить размеры и массу многослойной платы и корпуса с крышкой и таким образом улучшить массогабаритные характеристики ГИС.

Электрическое соединение части топологического рисунка проводников ГУН, соединяющей активные генераторный и управляющий компоненты с коаксиальным выходом КДР, рас-

положенное на торцевой поверхности КДР, и наличие в его составе ёмкостных связей с плёночными проводниками топологического рисунка, расположенного на лицевой стороне диэлектрического слоя МПП, позволило сократить длину соединения и тем самым сократить паразитные индуктивности и ёмкости соединений, а значит, улучшить электрические характеристики ГИС.

Выполнение ёмкостной связи между торцом плёночного проводника соединения генераторного компонента и коаксиальным выходом диэлектрического резонатора в виде зазора шириной от 0,14 до 0,18 мм, а также ёмкостной связи между боковой стороной плёночного проводника соединения управляющего компонента и коаксиальным выходом диэлектрического резонатора в виде зазора шириной от 0,16 до 0,20 мм позволяют сократить длину связей, а значит, уменьшить паразитные индуктивности и ёмкости соединений и тем самым улучшить электрические характеристики ГИС.

Ограничение ширины зазора ёмкостной связи между торцом плёночного проводника соединения генераторного компонента и коаксиальным выходом диэлектрического резонатора снизу (0,14 мм) связано с нежелательным уменьшением рабочей частоты генератора, а сверху (0,18 мм) – с отсутствием генерации, а значит, с ухудшением электрических характеристик.

Ограничение ширины зазора ёмкостной связи между боковой стороной плёночного проводника соединения управляющего компонента и коаксиальным выходом диэлектрического резонатора снизу (0,16 мм) также связано с нежелательным уменьшением рабочей частоты генератора, снижением диапазона частоты перестройки ГУН, а сверху (0,2 мм) – с отсутствием генерации, а значит, с ухудшением электрических характеристик. Рассмотренный случай модернизации конструкции представлен на рис. 1 и 2 и предполагает расположение КДР на поверхности платы, на специальной посадочной площадке в составе топологического рисунка металлизации.

Устройство состоит из активной части – транзистора с цепями смещения и согласования в составе топологического рисунка металлизации – и перестраиваемого резонансного контура, включающего в себя цепь варакторного диода и цепь КДР.

В качестве примера конкретного выполнения такого конструктивного варианта представим следующую ГИС генераторного модуля СВЧ-диапазона. Схема имеет размеры $20 \times 18 \times 10,5$ мм и массу 7,35 г, выполнена в виде многослойной печатной платы, имеющей четыре диэлектрических слоя. Материалом диэлектрических слоёв является Ro4003 толщиной 0,2 мм. Каждый из диэлектрических слоёв МПП имеет топологический рисунок металлизации проводников, выполненный из меди толщиной 18 мкм с гальваническим покрытием золотом толщиной 3 мкм. На обратной стороне верхнего и нижнего диэлектрического слоя нанесена экранная заземляющая металлизация со структурой, аналогичной структуре топологического рисунка проводников металлизации. На лицевой поверхности верхнего диэлектрического слоя МПП установлены навесные компоненты, в том числе активный генераторный компонент (например, биполярный транзистор BFP420F), активный управляющий компонент (например, варакторный диод ВВУ55), конденсаторы типа К10-17 и другие, а также КДР размером $6,0 \times 4,5 \times 4,0$ мм (производства ООО «Керамика»). Корпус и крышка ГИС генераторного модуля изготовлены из сплава АМГ с последующим гальваническим покрытием составом палладий-никель толщиной 6 мкм.

МПП своей обратной стороной, имеющей экранную заземляющую металлизацию, припаяна к дну корпуса припоем ПИНСр-3. КДР установлен и припаян припоем ПОИН-50 на топологический рисунок металлизации верхнего диэлектрического слоя, а его металлизационное покрытие на боковой поверхности соединено, например, через топологический рисунок металлизации проводников и металлизированное отверстие с экранной заземляющей металлизацией на обратной стороне МПП.

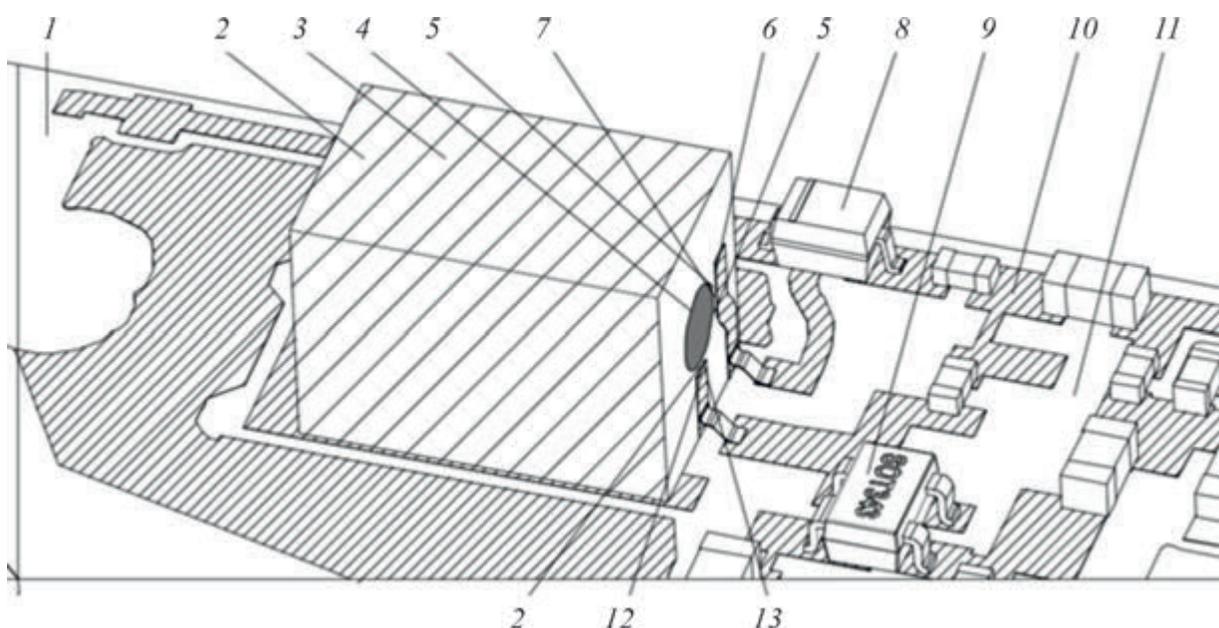


Рис. 1. Конструкция ГИС генераторного модуля с частью топологического рисунка проводников на торцевой поверхности КДР, расположенного на поверхности МПП:

1 – МПП; 2 – КДР; 3 – металлизационное покрытие на боковой поверхности КДР; 4 – коаксиальный выход на торцевой поверхности КДР; 5 – зазор между боковой стороной 6 плёночного проводника соединения управляющего компонента и коаксиального вывода диэлектрического резонатора; 7 – ёмкостные связи; 8 – активный управляющий компонент; 9 – активный генераторный компонент; 10 – топологический рисунок металлизации проводников; 11 – диэлектрический слой; 12 – торец плёночного проводника соединения генераторного компонента; 13 – зазор между торцом 12 плёночного проводника соединения генераторного компонента и коаксиальным выходом диэлектрического резонатора; 14 – корпус; 15 – крышка корпуса; 16 – ГУН; 17 – металлизированные отверстия; 18 – экранная заземляющая металлизация

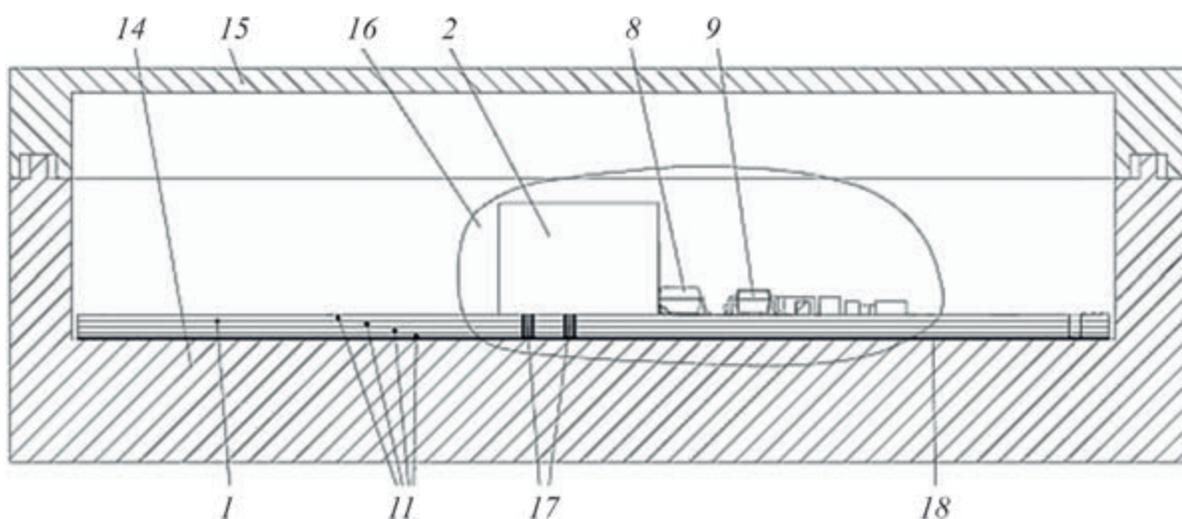


Рис. 2. Разрез ГИС генераторного модуля с частью топологического рисунка проводников на торцевой поверхности КДР, расположенного на поверхности МПП (нумерация позиций соответствует рис. 1)

3. РАБОТА УСТРОЙСТВА

Разработанное устройство работает следующим образом. При подаче питания на активный генераторный компонент (транзистор), за счёт схемотехнического решения ГИС генератора создаётся область рабочего диапазона с отрицательным сопротивлением в базовой области транзистора. При подключении к этой цепи КДР с определённой добротностью происходит возбуждение транзистора на резонансной частоте подключаемого контура. Подачей напряжения на активный управляющий компонент (варакторный диод) осуществляется перестройка частоты резонансного контура в рабочем диапазоне частот.

Снижение паразитной индуктивности и ёмкости топологического рисунка проводников МПП за счёт уменьшения длины соединения коаксиального выхода КДР и площади МПП ГУН, а значит, и размеров корпуса и крышки путём переноса части проводников топологического рисунка ГУН, соединения активных генераторного и управляющего компонентов с коаксиальным выходом КДР, расположения на торцевой поверхности КДР части проводников топологического рисунка и наличия в её составе ёмкостных связей, электрического соединения с плёночными проводниками топологического рисунка, расположенного на лицевой стороне верхнего диэлектрического слоя многослойной платы, улучшило электрические и массогабаритные характеристики ГИС. Это объясняется тем, что снижение паразитной индуктивности и ёмкости снижает шунтирующий эффект паразитных ёмкостей и индуктивностей печатной платы, повышает нагруженную добротность КДР и рабочую частоту генератора.

В целом за счёт сохранения оптимального размера КДР и соответственно обеспечения его (КДР) более высокой добротности удаётся снизить уровень фазовых шумов генератора, а также улучшить его электрические характеристики и уменьшить массу и габариты ГИС.

4. ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Модернизация конструкции ГИС ГУН СВЧ-диапазона путём размещения части топологического рисунка металлизации проводников верхнего слоя МПП на торцевой поверхности КДР и выполнения связи коаксиального вывода с этой частью проводников через ёмкостные связи в виде зазоров позволяет снизить паразитную ёмкость и индуктивность схемы и тем самым улучшить электрические характеристики ГУН.
2. Уменьшение площади, занимаемой ГУН, даёт возможность сократить размеры МПП, металлического корпуса и крышки, а следовательно, улучшить массогабаритные характеристики генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баронов, А. А. Особенности проектирования гетеродина с петлёй ФАПЧ Ku -диапазона / А. А. Баронов, В. А. Шадский // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2015. – Вып. 4 (160). – С. 18 – 22.
2. Малогабаритный опорный СВЧ-генератор на коаксиальном резонаторе / С. А. Самохин, И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 2 (541). – С. 58 – 66.
3. Патент № 2750860 РФ, МПК Н 01 L 21/00, 23/23. Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона: приоритет 21.09.2020. / С. А. Самохин, И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Е. В. Терёшкин.

4. Улучшение электрических характеристик ГИС СВЧ-диапазона генераторного модуля / И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Н. А. Фёдоров [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – Октябрь 2022. – Т. 24, № 5. – С. 223 – 229. – DOI: 10.17587/nmst/24/223–229.

5. Улучшение массогабаритных характеристик ГИС СВЧ-диапазона генераторного модуля / И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Н. А. Фёдоров [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2022. – Вып. 4 (555). – С. 51 – 63.

6. Патент № 2777532 РФ, МПК Н 01 L 27/12. Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона: приоритет 7.09.2021 // И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Е. В. Терёшкин, Н. А. Фёдоров.

Статья поступила 31 октября 2022 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. Монография / Под ред. Ю. В. Гуляева. – М.: Радиотехника, 2020. – 504 с.

Рассмотрены устройства на поверхностных и объемных акустических волнах. Приведены принципы построения акустооптических и акустоэлектронных фурье-процессоров, даны методики их описания и характеристики. Синтезированы алгоритмы многоканальных частотных дискриминаторов, имеющих широкую дискриминационную характеристику с большой зоной линейности, что повышает точность измерения частоты радиосигналов, а также стабильность работы следящих измерителей частоты при интенсивных воздействиях помех. Обобщены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований волноводных СВЧ-фильтров и мультиплексоров X -диапазона частот на основе прямоугольных и круглых волноводов. Показано, что устройства предназначены для работы в составе негерметизированных радиоэлектронных комплексов спутниковых систем космической связи. Исследованы двумерные периодические структуры в виде перфорированных тонких металлических экранов, малые размеры и масса которых делают их технологически привлекательными в технике миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Изложен широкий круг вопросов, связанных с разработкой новых типов высоко-избирательных микрополосковых фильтров на основе сложных топологических структур с ограниченным числом резонаторов и многочисленными связями между ними, что позволяет при малых размерах фильтров обеспечить высокие электрические параметры.

Представленные известные и оригинальные авторские решения по широкому спектру вопросов проектирования устройств селекции могут быть полезны широкому кругу научных работников и инженеров, специализирующихся в области проектирования и производства фильтров и аналоговых фурье-процессоров.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 666.762.1; 666.7-4

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПЛОТНОЙ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ, СПЕЧЕННОЙ В УСЛОВИЯХ SPS

А. Г. Анисимов¹, В. А. Безлепкин¹, **В. И. Мали**¹,
Ю. Л. Михлин², Е. Ю. Токарева³, Д. А. Немущенко⁴

¹ *Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск*

² *Красноярский региональный центр коллективного пользования СО РАН*

³ *Восточно-Сибирский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
физико-технических и радиотехнических измерений, г. Иркутск*

⁴ *ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск*

Высокоплотная корундовая керамика, благодаря совокупности высоких физико-технических свойств и своей относительно небольшой стоимости, является одной из наиболее востребованных в различных отраслях промышленности. Одним из направлений её использования является электронная техника, в частности диэлектрические пассивные платы для гибридных интегральных схем СВЧ-диапазона.

КС: электрокорунд, шероховатость, макродефекты, плотность, керамика, метод SPS

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-DENSITY CORUNDUM CERAMICS SINTERED UNDER SPS CONDITIONS

A. G. Anisimov¹, V. A. Bezlepkin¹, **V. I. Mali**¹,
Yu. L. Mikhlin², E. Yu. Tokareva³, D. A. Nemuschenko⁴

¹ *Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk*

² *Krasnoyarsk Regional Center for Collective Use SB RAS*

³ *East-Siberian Branch of the All-Russian Research Institute of Physicotechnical
and Radioengineering Measurements, Irkutsk*

⁴ *FSEI HE «Novosibirsk State Technical University»*

Due to combination of high physical and technical properties and its relatively low cost, high density corundum ceramics is one of the most popular in various industries. One of the directions of its use is electronic technology, in particular dielectric passive plates for microwave hybrid integrated circuits.

Keywords: fused alumina, roughness, macrodefects, density, ceramics, SPS method

К этим платам предъявляется большое количество требований [1], начиная от стабильности диэлектрических параметров, прочности и заканчивая качеством поверхности, что обусловлено постоянно возрастающими требованиями к миниатюризации в микроэлектронике. Влияние поверхностных дефектов подложек на систему тонкоплёночных соединений показано в работе [2].

Известно [3], что качество поверхности керамики связано с её микроструктурой, а именно более мелкокристаллические образцы керамики с однородной микроструктурой имеют наиболее высокие показатели качества полированной поверхности.

Получение керамики с мелкокристаллической структурой и одновременно с высокой плотностью является сложной технической задачей. Однако это в определённой степени удалось авторам работы [4] за счёт применения тонкодисперсного корундового порошка, полученного из солей алюминия с последующим помолом, а в [5] за счёт 10-минутной выдержки образцов в атмосфере водорода при температуре 1900 °С. Перечисленные методы либо очень затратные, либо мало подходят для использования в промышленном варианте.

Перспективно в этом случае применение инновационной технологии искрового плазменного спекания (ИПС), известной в России как электроимпульсное спекание под давлением (ЭИСД) [6], а за рубежом как *spark plasma sintering* (SPS) [7].

Основное предназначение ИПС – это высокоскоростное спекание порошковых материалов любой природы. Уникальность технологии ИПС заключается в механизме спекания. В технологии ИПС спекание частиц порошка осуществляется за счёт внутренней тепловой энергии материала, в этом состоит её ключевое отличие от других видов спекания, где необходимая энергия сообщается материалу извне, что требует многочасовой выдержки [8].

Возможности этого способа были использованы авторами работы [9] для получения высокоплотной корундовой керамики с однородной мелкокристаллической структурой.

Исходный порошок электрокорунда помещался в цилиндрическое отверстие в форме между пуансонами, через которые пропускали электрический ток, и прикладывали одноосное сжатие с давлением 40 МПа. Спекаемая керамика до температуры 1200 °С имела белый цвет, но плотность ниже заданной, а плотность 99 % была достигнута лишь при повышении температуры до 1350 °С. Однако цвет керамики при этом становился темным. Исследование качества полированной поверхности тёмной керамики под микроскопами МБС-10 и Carl Zeiss Axiovert 40 Mat позволило установить отсутствие каких-либо видимых дефектов на её поверхности, но измерение относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ на эталонной установке ЭУ-1 (анализатор цепей скалярный Р2М-40 и объёмный щелевой резонатор ОБР-2) государственного первичного эталона ГЭТ 110-2012 показало, что при частоте 10^{10} Гц значение $\text{tg}\delta$ находится на уровне $(8...12)\cdot 10^{-4}$, а $\epsilon \sim 9,95$. В то же время по ТУ на подложки из корундового материала ВК100-1 (поликор) [10] тангенс угла диэлектрических потерь не должен превышать значения $1\cdot 10^{-4}$, а относительная диэлектрическая проницаемость при этой частоте должна находиться в пределах $9,75\pm 0,25$.

Изучение состава нашей потемневшей керамики показало наличие в ней углерода.

Рентгеновские фотоэлектронные спектры (РФЭС) образцов керамики были измерены на фотоэлектронном спектрометре SPECS с энергоанализатором PNOIBOS 150 MCD 9 (Красноярский региональный центр коллективного пользования СО РАН), используя монохроматизированное Al K α -излучение рентгеновской трубки (1486,7 эВ). Обзорные спектры записаны при энергии пропускания энергоанализатора 20 эВ, спектры высокого разрешения (узкие сканы) – с энергией пропускания 10 эВ. Вакуум в аналитической камере – не хуже 10^{-9} мБар. Электростатическую подзарядку устраняли, облучая образец медленными электронами; поверхность очищали бомбардировкой ионами Ag⁺ с энергией 2,5 кэВ и ионным током 20 мкА в течение 10...30 мин. Обработку спектров выполняли с использованием программного пакета CasaXPS. Поверхностные концентрации элементов определяли по обзорным спектрам. Разложение спектров высокого разрешения проводили после вычитания нелинейного фона по Ширли с использованием максимумов гауссовско-лоренцевской (30 %) формы.

На рис. 1 представлены фотоэлектронные обзорные спектры и спектры высокого разрешения кислорода, углерода и алюминия образцов после спекания при 1350 °С; поверхностные концентрации других элементов после ионной очистки ниже предела обнаружения РФЭС. «Черные» области, образующиеся после спекания, содержат графитоподобный углерод, а также небольшие концентрации кислорода и некоторые другие примеси, а линии алюминия отсутствуют; спектры на рисунке не приведены. Спектры «светлых» участков соответствуют гидроксильной поверхности оксида алюминия, а также карбида алюминия. О первом свидетельствуют линии Al 2p с энергией связи 74,7 эВ и компоненты полосы O 1s с энергиями 531,5 эВ, отвечающие гидроксидным группам и, частично, кислороду в слое поверхностных органических загрязнений, и 530,4 эВ (анионы O²⁻ в решетке оксида алюминия). Наиболее интенсивные компоненты в разложении спектров C 1s с энергиями 284,7 и 286,2 эВ следует отнести к углероду с sp²-гибридизацией (скорее всего, графитоподобному) и группам СОН соответственно; интенсивности других линий кислородсодержащих соединений углерода с более высокими энергиями связи незначительны. Кроме того, линии C 1s с энергией связи около 283 эВ и Al 2p (72,8 эВ) и их соотношение, немного превышающее 1, указывают на присутствие карбида алюминия, близкого к Al₄C₃ (26 % от общей концентрации Al). Увеличение продолжительности ионного травления практически не влияет на их относительные интенсивности, то есть карбид алюминия находится не только на поверхности, но и в более глубоких слоях материала.

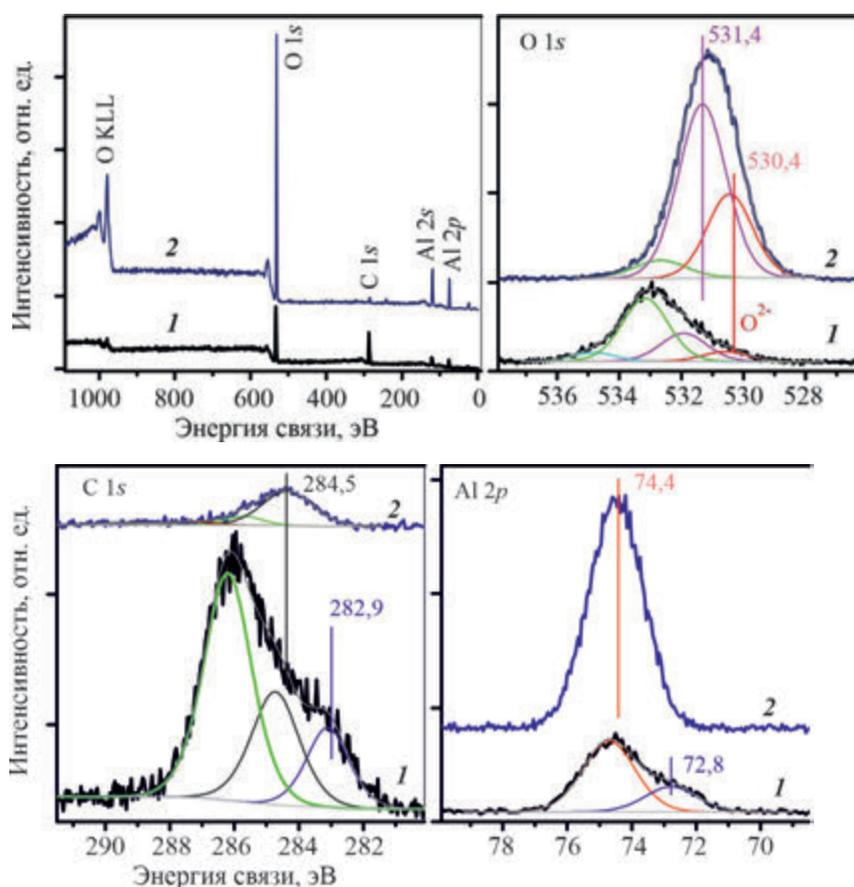


Рис. 1. Рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов керамики после спекания при 1350 °С (1) и после дополнительного отжига в окислительной атмосфере (2), измеренные после травления ионами Ag⁺ в течение 10 мин (2,5 кэВ, 20 мкА)

Спектры существенно изменяются после дополнительного отжига: снижается концентрация углерода, концентрации кислорода и алюминия растут, а в спектрах C 1s и Al 2p линии карбида исчезают.

Потемнение образцов керамики при спекании методом SPS ранее уже отмечали авторы работы [11]. Такое явление они связывали с наличием фазы углерода в составе образцов, который диффундировал из графитовых электродов, пресс-формы и изоляционной бумаги. С целью исключения углерода из образцов керамики они использовали несколько подходов: отжиг спеченной керамики в воздухе; использование диффузионных барьеров (тантал, глинозем); предварительное уплотнение керамики, проводимое спеканием без давления в безуглеродной среде для закрытия путей диффузии углерода путём удаления открытой пористости до начала спекания в условиях SPS.

С целью удаления углерода из потемневшей керамики мы опробовали дополнительный обжиг в воздушной атмосфере в интервале температур от 900 до 1200 °С. Такой приём позволил уменьшить значение тангенса угла диэлектрических потерь, но не до требуемых величин.

Использование при спекании диффузионных барьеров в виде дисков из Мо толщиной 0,5 мм, которые помещались между спекаемым образцом и пуансонами, уменьшает, но не исключает углеродное загрязнение. Поэтому был опробован вариант с предварительным уплотнением керамики. Принимая во внимание, что печь корундовую керамику до плотности, близкой к теоретической, возможно только либо в вакууме, либо в атмосфере водорода [12], была выполнена операция предварительного уплотнения до относительной плотности 95 % в атмосфере водорода.

При последующем спекании образцов, предварительно уплотнённых в атмосфере водорода, в условиях SPS при температуре 1350 °С была достигнута относительная плотность 98,0 %. Образцы, спеченные по двухступенчатому режиму, имели белый цвет с сероватым оттенком и следующие электрофизические показатели: тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^{10} Гц – $(0,5 \dots 0,7) \cdot 10^{-4}$ и относительная диэлектрическая проницаемость – $9,95 \pm 0,05$. Однако сравнение микроструктуры керамики, полученной таким образом, и керамики, полученной в работе [9], позволило установить, что в результате двухступенчатого спекания образцов структура становится значительно менее однородной с размером кристаллов от 1 до 10 мкм (рис. 2). Как следствие, после операции полирования на её поверхности появляется значительное количество макродефектов в виде раковин с размером до 10 мкм (рис. 3). Полученный результат, по-видимому, связан с ускоренным ростом кристаллов керамики, происходящим уже во время первого этапа свободного спекания в атмосфере водорода.

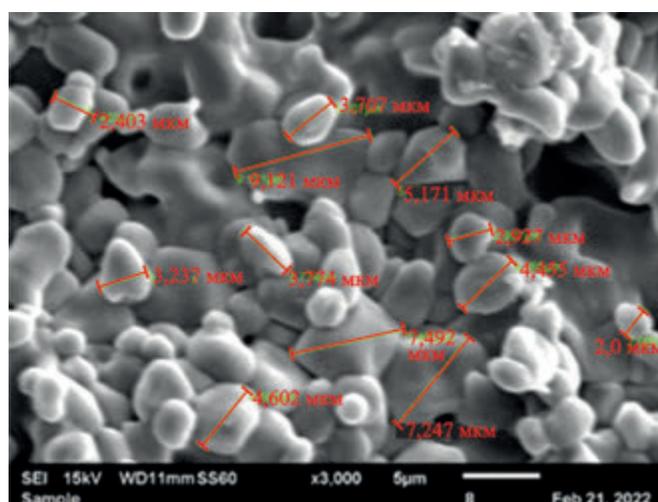


Рис. 2. Микроструктура керамики после двухступенчатого спекания

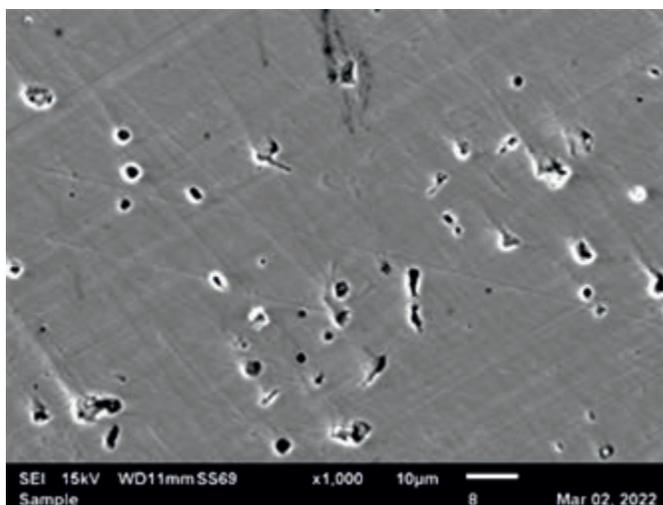


Рис. 3. Полированная поверхность керамики после двухступенчатого спекания

Таким образом, показано, что путём спекания порошка электрокорунда в условиях SPS с предварительным уплотнением в атмосфере водорода можно получить высокоплотную корундовую керамику с диэлектрическими параметрами, соответствующими ТУ на подложки из корундового материала ВК 100-1. Но, в отличие от результатов, полученных в работе [9], качество полированной поверхности полученной керамики ухудшилось за счёт появления макродефектов в виде раковин, образующихся в результате потери однородности микроструктуры керамики.

Полагаем, что на основании полученных результатов имеет смысл изучить возможность улучшения однородности микроструктуры за счёт предотвращения ускоренного роста кристаллов на первом этапе свободного спекания путём уменьшения степени уплотнения, достигаемой на этом этапе спекания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ микроструктуры, качества поверхности и свойства подложек из оксида алюминия / Е. С. Лукин, Е. В. Ануфриева, Н. А. Попова [и др.] // Стекло и керамика. – 2010. № 9. – С. 9 – 14.
2. **Сандэл, Р.** Влияние поверхностных дефектов подложек из окиси алюминия на систему тонкоплёночных межсоединений / Р. Сандэл, Э. Сидора; под ред. А. Рейсмана, К. Роуза // Технология толстых и тонких плёнок. – М.: Мир, 1972. – С. 101 – 107.
3. **Масловская, И. В.** Новая малопористая корундовая керамика / И. В. Масловская, Г. К. Кирилова, Г. А. Михайлова // Электронная техника. Сер. 5. – 1972. – Вып. 1. – С. 11 – 19.
4. **Pat. 6417127B1 US, C 04 B 35/115.** Translucent polycrystalline ceramic and method for making same / Hiroshi Yamamoto, Takashi Mitsuoka, Satoshi Iio. – 2002.
5. **Pat. 3311482A US, C 04 B 35/115.** Sintered transparent bodies of aluminum oxide and method of preparing the same / Emill A. Klingler, Walther Dawihl, Erhard Dorre. – 1967.
6. **Григорьев, Е. Г.** Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков: учебн. пособие / Е. Г. Григорьев, Б. А. Калинин. – М.: МИФИ, 2008. – 152 с.
7. **Tokita, M.** Trends in advanced SPS sparc plasma sintering systems and technology / M. Tokita // J. Soc. Powd. Technol. – 1993. – Vol. 30. – P. 790 – 794.

8. **Хасанов, О. Л.** Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, З. Г. Бикбаева. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. – 212 с.
9. **Анисимов, А. Г.** К вопросу получения высокоплотной корундовой керамики с бездефектной полированной поверхностью и низкой шероховатостью методом SPS / А. Г. Анисимов, В. А. Безлепкин, В. И. Мали // Стекло и керамика. – 2021. – № 10. – С. 24 – 28.
10. **ТУ 6366-000-07593894-2013.** Подложка.
11. A comprehensive study of the carbon contamination in tellurite glasses and glass-ceramics sintered by spark plasma sintering (SPS) / A. Bertrand, J. Carreaud, G. Delaizir [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. – 2013. – Vol. 97, No 1. – P. 163 – 172.
12. **Coble, R. L.** Sintering alumina: effect atmospheres / R. L. Coble // J. Amer. Ceram. Soc. – 1962. – Vol. 45, № 3. – P. 123 – 127.

Статья поступила 8 декабря 2022 г.,
после переработки – 6 февраля 2023 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Цифровые двойники. Монография / Под ред. Созинова П. А. – М.: Радиотехника, 2022. – 312 с. (Науч. серия «Принятие решений в управлении»).

Широкое применение ЭВМ в математическом моделировании сформировало мощную теоретическую и экспериментальную базу и доказало высокую эффективность концепции вычислительного эксперимента. Материал, представленный в монографии, раскрывает прикладные аспекты организации и проведения экспериментальных исследований. Сложность технических комплексов потребовала детализации оснований новой универсальной методологии, основанной на концепции моделирования. Практика требует создания сложных и полных моделей, поэтому образование структуры процесса моделирования связано с эффективным способом преодоления сложности на основе использования принципов и методов системных исследований. В монографии существенное внимание уделено «глубине» детализации особенностей разработки методического аппарата построения моделей динамического поведения объектов, входящих в состав радиотехнических комплексов. При этом достаточно подробно изложены принципиальные положения применения элементов компьютерной алгебры. С высокой степенью детализации рассмотрена проблема формирования методологической основы создания модели многокритериального подхода к оценке эффективности разнотипных средств.

Для студентов, аспирантов, научных сотрудников и руководителей, деятельность которых связана с вопросами принятия управленческих решений, процессов моделирования при создании сложных технических систем.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65:61

50 ЛЕТ СОЗДАНИЮ НОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ – БИМЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ. АКАДЕМИК Н. Д. ДЕВЯТКОВ

К. Д. Казаринов, И. Г. Полников

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

Представлены начало и основные вехи развития научного направления – изучение биологической чувствительности КВЧ-излучения низкой интенсивности, которое было основано в НПП «Исток» под руководством академика Н. Д. Девяткова. Приведены основные этапы научных исследований, выполненных с участием различных предприятий нашей страны, в том числе и ФирЭ им. В. А. Котельникова РАН. Показаны не только результаты экспериментальных и теоретических исследований, но и возможности использования этих результатов в практической медицине. Приведены примеры современных работ в этом направлении и перспективы его дальнейшего развития.

КС: микроволновое излучение, КВЧ, окислительный стресс, микроорганизмы, механизмы биологической чувствительности КВЧ-излучения, биологические мембраны

50 YEARS OF THE CREATION OF A NEW DIRECTION – BIOMEDICAL RADIOELECTRONICS. ACADEMICIAN N. D. DEVIATKOV

K. D. Kazarinov, I. G. Polnikov

FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino

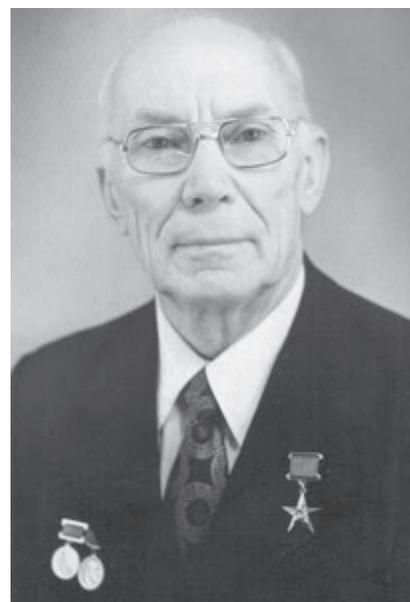
The beginning and main milestones in the development of the scientific direction are presented – the study of the biological sensitivity of low intensity EHF radiation, which was founded in JSC «Istok» under the guidance of academician N. D. Devyatkov. The main stages of scientific research, carried out with the participation of various enterprises of our country, including FIRE named after V. A. Kotelnikov, are presented. Not only the results of experimental and theoretical studies are shown, but also possibilities of using these results in practical medicine. Examples of modern works in this direction and prospects for its further development are given.

Keywords: microwave radiation, EHF, oxidative stress, microorganisms, mechanisms of biological sensitivity of EHF radiation, biological membranes

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной медицины с начала 60-х годов обеспечивалось во многом появлением новых биофизических методов и приборов. Известны методы диагностики, использующие эффекты электронного парамагнитного резонанса, ультразвука, оптического и инфракрасного излучений, лазерной спектроскопии и т. д. В то же время разработка и производство новых радиоэлектронных приборов позволили внедрять в медицинскую практику с целью терапевтических воздействий генераторы лазерных и микроволновых излучений [1]. Одним из пионеров в этой новой области

науки и техники выступило в те годы предприятие НПП «Исток» под научным руководством академика Н. Д. Девяткова. Появление в 60-х годах серии широкополосных генераторов микроволнового излучения – ламп обратной волны (ЛОВ) – позволило проводить эксперименты по изучению биологической чувствительности в данном диапазоне длин волн [2]. Началу исследований послужили наблюдения сотрудников, работавших с ЛОВ КВЧ-диапазона, которые заметили изменение концентрации микрофлоры в воздухе помещения лаборатории [3]. Аналогичные результаты были продемонстрированы петербургскими специалистами [4], которые показали, что в результате работы КВЧ-генератора на протяжении четырех дней количество микробов в воздухе уменьшилось по сравнению с контрольными данными примерно в десять раз. В дальнейшем были найдены оптимальные условия облучения, при которых отмечалась наиболее эффективная стерилизация «чистых» производственных и медицинских помещений. В экспериментах с кишечной палочкой в те же годы был обнаружен эффект воздействия КВЧ-излучения низкой интенсивности. Облучение интенсивностью 4-5 мВт/см² при длине волны 7,2 мм во всех случаях приводило к уменьшению количества живых организмов по сравнению с контролем [5]. Тогда же у ученых появилась идея об использовании КВЧ-излучения в медико-биологических исследованиях, основанная на том, что клетки живых организмов в процессе эволюции не воспринимали этот диапазон электромагнитных излучений (ЭМИ) из-за его отсутствия в окружающей среде и, следовательно, могут оказаться весьма чувствительными к его воздействию. Другая гипотеза об особой роли КВЧ-излучения в процессах жизнедеятельности состояла в том, что поскольку в природе отсутствуют источники КВЧ-излучения, то живые клетки могли бы использовать излучение этого диапазона для построения систем управления и регуляции самого организма [6]. Следует отметить и появление зарубежных сообщений о результатах исследований влияния миллиметрового излучения низкой интенсивности на размножение микроорганизмов [7, 8]. В то же время было обнаружено протекторное действие КВЧ-излучения на клетки костного мозга мышей при радиационном облучении [9]. С самого начала определяющий вклад в развитие всего направления вносили советские физики и инженеры, работающие в прямом контакте с медиками и биологами. Постепенно экспериментальные результаты разрозненных исследовательских групп стали складываться в значительное научное направление, о котором было объявлено на научной сессии Отделения общей физики и астрономии (17–18 января 1973 г.) в докладе академика Н. Д. Девяткова и опубликовано в журнале «Успехи физических наук» [10]. С той поры в исследование биологических эффектов миллиметровых волн низкой интенсивности были вовлечены сотни ученых нашей страны, организованы выпуски специальных журналов и сборников статей под редакцией Н. Д. Девяткова, регулярные конференции с международным участием под председательством Н. Д. Девяткова и защищены многочисленные кандидатские и докторские диссертации. В 80-х годах появились положительные результаты применения КВЧ-облучения низкой интенсивности в клинических условиях: лечение язвенных образований на глазах (язвенный кератит), язвы желудка и двенадцатиперстной кишки. В дальнейшем число патологий, в лечении которых использовалось КВЧ-излучение, превысило несколько десятков [1].



Н. Д. Девятков
(1907 – 2001 гг.)

Масштабная работа, выполненная в последующие годы, позволила сформулировать основные закономерности обнаруженного биологического действия КВЧ-излучения, предложить ряд идей для изучения механизмов наблюдаемых эффектов и продолжить его использование в лечебной практике [11].

Для развития биофизической базы исследований в ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, в отделе, возглавляемом академиком Н. Д. Девятковым, на основе лаборатории профессора О. В. Бецкого была создана группа по изучению эффектов и механизмов биологической чувствительности КВЧ-излучения низкой интенсивности и созданию перспективных направлений исследований. Результатам деятельности этой группы и посвящена данная статья.

2. РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В ФИРЭ ИМ. В. А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН БИОФИЗИЧЕСКОЙ ГРУППОЙ С 1980 Г.

Выяснение механизма биологического эффекта любого электромагнитного излучения подразумевает ответ на три вопроса: каковы особенности поглощения излучения в биологическом объекте; какие первичные физико-химические процессы в клетках вызываются этим поглощением; какие биохимические и физиологические реакции отвечают за отклик живой системы?

В соответствии с такой трехзвенной логической схемой и были запланированы работы нашей группы. Перед тем, как перейти к изложению материала, следовало бы объяснить использование в научной литературе по данному вопросу термина «излучение низкой интенсивности». Этим термином с самого начала исследований было принято обозначать уровни излучения мощности менее $10 \dots 20$ мВт/см², которые обычно не вызывают заметного увеличения температуры облучаемых объектов и при действии на кожу человека не воспринимаются им как нагрев. Читатели, знакомые с проблемой, знают, что при этом подразумеваются биологические эффекты таких и более низких интенсивностей излучения, которые не являются по своему механизму тепловыми, и для их объяснения привлекаются новые представления [12, 13].

2.1. Особенности поглощения КВЧ-излучения биологическими объектами

Согласно современным представлениям, вода является неотъемлемым структурным компонентом клеточных мембран [14]. Благодаря взаимодействиям, в воде отдельные липидные и белковые молекулы удерживаются вместе и формируют сложный надмолекулярный ансамбль, каким является биологическая мембрана [15]. Для молекул воды характерно специфическое взаимодействие, называемое водородной связью (Н-связью). Особенность такого взаимодействия состоит в том, что атом водорода, входящий в состав одной молекулы, образует вторую связь с атомом кислорода другой молекулы, в результате чего обе молекулы объединяются в комплекс, обладающий большой устойчивостью. Известны также модели устойчивых комплексов, состоящих из трех и пяти молекул воды [15]. Наличие в воде кластеров подтверждают данные рентгенографического анализа. Между неструктурированной частью воды и кластерами постоянно существует обмен молекулами. В работе [16] определено время жизни кластера – порядка $10^{-10} \dots 10^{-11}$ с, что соответствует времени релаксационных процессов в воде.

Экспериментально установленные значения коэффициента поглощения α для воды в области миллиметровых длин волн излучения составляют $20 \dots 30$ дБ/мм, что соответствует проникновению 90 % начальной интенсивности на глубину порядка 0,3 мм [17]. Из этих данных

вытекают два очень важных для последующего изложения вывода: для КВЧ-излучения основным поглощающим компонентом тела человека или животного является вода; проникновение КВЧ-излучения в тело человека или животного практически ограничивается кожным покрытием [18].

Необходимость контроля поглощенной мощности КВЧ-излучения в модельных и биологических объектах сложной формы и структуры стимулировала поиск новых методов измерения. Нами был предложен метод акустического детектирования поглощенной мощности (АДПМ), основанный на регистрации термоупругих колебаний, вызванных поглощением модулированного КВЧ-излучения. Термоупругие колебания при поглощении модулированного КВЧ-излучения генерируются в самом объекте и в слое воздуха, прилегающем к поглощающей поверхности. В обоих случаях амплитуда акустического сигнала пропорциональна поглощаемой мощности излучения [19].

2.2. Действие КВЧ-облучения на водные среды и модельные мембранные системы

Учитывая функциональную нагрузку биомембран в живых клетках, с самого начала исследований многие авторы высказывали предположения о том, что мембранные системы окажутся чувствительными к КВЧ-облучению низкой интенсивности.

Была предложена модель, которая не опирается на строение отдельной молекулы, а рассматривает действие КВЧ-излучения на организм с позиций кооперативных свойств субклеточных структур (клеточных мембран). Предполагается, что в клеточных мембранах существуют колебания дипольных групп, причем на возбуждение этих колебаний затрачивается энергия метаболизма. Теоретическое рассмотрение приводит к выводу о том, что в такой системе может возникнуть стационарное состояние, в котором энергия запасается в единственной колебательной моде (Бозе-конденсация). Если скорость распространения звука, определяемая модулем упругости липидного бислоя толщиной 100 Å, составляет $10^5 \dots 10^6$ см/с, то частота колебаний этой моды как раз соответствует диапазону мм-волн, т. е. равна $10^{11} \dots 10^{12}$ Гц [20]. Все это подразумевает возможность взаимодействия КВЧ-излучения с мембранной структурой живой клетки. В наших работах было показано, что КВЧ-излучение способно стимулировать ионную проводимость модельных бимолекулярных липидных мембран (БЛМ), если узким местом процесса (лимитирующей стадией) является стадия проводимости в примембранных неперемешиваемых слоях. Эффект облучения проявлялся только в случае модифицированных БЛМ, у которых ионная проводимость была увеличена введением селективных индукторов ионного транспорта (валиномицина или 2,4-динитрофенола). Включение КВЧ-облучения обратимо снижало сопротивление БЛМ, и этот эффект возрастал при увеличении разности потенциалов, приложенной к мембране [21]. Аналогичное увеличение пассивной проводимости для ионов наблюдалось в экспериментах с препаратом кожи лягушки. Под действием излучения с интенсивностью 1 мВт/см² и выше наблюдалось увеличение потенциала и тока короткого замыкания. Обнаруженный эффект усиливался при увеличении интенсивности облучения [22].

Итак, первый шаг в изучении механизмов биологической чувствительности КВЧ-излучения нами был сделан в направлении изучения модельных и биологических мембран в водных средах. Следующий этап исследований был посвящен ответу на вопрос, каким образом КВЧ-излучение способно корректировать потоки ионов в примембранных водных слоях?

2.3. Изучение конвективного движения в водных средах

Простые опыты с наблюдением движения в воде «тушевых нитей» вблизи вертикальной стенки кварцевой кюветы или размывтия границы «сахароза-вода» при КВЧ-облучении обнаружили перемешивание водных слоев вблизи поверхности, на которую падает излучение.

Исследование профиля температуры, образующегося при облучении тонких слоев воды оптическими методами, показало, что распределение температуры при поглощении КВЧ-излучения указывает на движение жидкости.

В наших экспериментах наблюдался конвективный «факел» в середине кюветы при плотности падающей мощности 20 мВт/см^2 . Механизм конвективного движения в этом случае, очевидно, термогравитационный, т. е. связан со всплыванием нагретых элементов жидкости [23].

Существенно иной характер имеет неустойчивость тонких слоев воды, в которых доминирующее влияние оказывает термокапиллярный эффект (межфазная конвекция). Высокое поглощение воды и, следовательно, малая глубина проникновения КВЧ-излучения приводят к тому, что вся падающая мощность поглощается в тонком слое, т. е. в воде появляется градиент температуры. Можно было видеть, как более светлый слой, температура которого повышена в результате поглощения КВЧ-излучения, начинает растягиваться по поверхности, вовлекая в движение жидкость по всей кювете. Излучение падало в данном случае через боковую стенку кюветы. Однако в любом случае при поглощении водой КВЧ-излучения появление градиента температуры вызывает градиент поверхностного натяжения и, следовательно, движение жидкости в поверхностном слое [24].

Для количественной оценки порога конвекции в условиях КВЧ-облучения мы использовали полярографический метод, основанный на том, что предельный диффузионный ток разряда на электроде какого-либо иона определяется скоростью его поступления к поверхности электрода [25]. Результаты экспериментов свидетельствуют о возрастании полярографического тока для O_2 при КВЧ-облучении приэлектродного слоя. В системе с вытеснением кислорода воздуха аргоном эффект КВЧ проявлялся гораздо ярче. Оказалось, что КВЧ-облучение при плотности потока мощности 1 мВт/см^2 ускоряет нарастание концентрации O_2 в растворе почти в два раза. Таким образом, следует ожидать, что под действием КВЧ-излучения может увеличиваться скорость пассивного переноса ионов и молекул в водных средах за счет изменения гидродинамической устойчивости. С учетом вышесказанного можно попытаться объяснить эффекты КВЧ-излучения в экспериментах с участием химических реакций в мембранах, учитывая возможность ускорения доставки реагентов к месту реакции. Например, скорость накопления продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в суспензии липосом. В результате окисления фосфолипидов увеличивается проницаемость мембран для ионов и других важных биологических веществ (один из механизмов патологии клетки). Независимо от способа инициирования окисления, КВЧ-излучение приводило к ускорению процессов ПОЛ и дозовая зависимость имела пороговый характер от значений ниже 1 мВт/см^2 . Предполагается, что данный эффект связан с увеличением скорости доставки кислорода к месту реакции ПОЛ [25].

В наших экспериментах исследовалось также действие КВЧ-излучения на УФ-фотолиз дрожжевых клеток. Было обнаружено, что КВЧ-излучение низкой интенсивности увеличивает выход из клеток в среду продуктов нуклеопротеидной природы с максимумом поглощения 260 нм [26]. Дозовая зависимость показывает проявление эффекта при интенсивности облучения порядка 1 мВт/см^2 и отсутствие зависимости от мощности излучения при интенсивности 10 мВт/см^2 .

Возможно, в данном случае ускорение лизиса при фотохимическом процессе связано с ускорением процесса переноса продуктов реакции в водной фазе под действием КВЧ-излучения.

Полученные данные об обнаруженных эффектах движения внутриклеточной цитоплазматической жидкости при наличии градиентов температуры, создаваемых ядром клетки, митохондриями и другими внутриклеточными источниками тепла, подтверждают возможность дальнейшего исследования конвекции в условиях КВЧ-облучения в экспериментах *in vivo* [27, 28].

2.4. Исследование фазовых переходов белок-липидных комплексов в мембранах

Часто эффекты ЭМИ не удается объяснить регистрируемым интегральным нагревом. Свидетельством тому – появившийся термин «температурный эквивалент» наблюдаемого эффекта. Особую важность оценка теплового эквивалента приобретает в том случае, когда объект очень чувствителен к изменению температуры. В некоторых случаях это может происходить из-за того, что температура окружающей среды, при которой проводится облучение биологического объекта, близка к температуре структурного перехода биологических мембран. Тогда повышение температуры даже на несколько десятых долей градуса может привести к новому фазовому состоянию биологической структуры, например белок-липидного комплекса, и отклик системы обнаруживает новое качество с явно выраженным пороговым эффектом.

Для выяснения подобной ситуации мы постарались найти модель, обладающую температурным порогом структурных изменений. В качестве такой модели мы использовали мембраны из насыщенных фосфолипидов – дипальмитоиллецитина (ДПЛ) с температурой фазового перехода (гель – жидкий кристалл) в области 42 °С. Выполняя нашу задачу исследований, мы пришли к необходимости воспользоваться тонким полиэтиленовым капилляром, заполненным суспензией липосом. Подобный способ облучения в капилляре, пропущенном сквозь широкую стенку волновода, обеспечивает хорошее согласование биологического объекта с волноводным измерительным трактом [29]. В экспериментах с липосомами из ДПЛ наблюдался отчетливый излом кривой поглощения при мощности 40...50 мВт. В случае липосом из яичного лецитина, которые претерпевают фазовый структурный переход при более высоких температурах, резких изменений зависимости поглощения от мощности сигнала мы не наблюдали. Таким образом, при воздействии микроволновым излучением на биологические структуры, находящиеся вблизи точки фазового перехода, достигается эффект дистанционного управления функциональной активностью клетки. Следует также отметить, что незначительное изменение температуры биообъекта, при котором наблюдается фазовый переход в рассматриваемом случае, не всегда может быть надежно зафиксировано измерительным прибором, и эффект микроволнового излучения будет ложно истолкован как «нетепловой».

2.5. Изучение окислительных процессов в клетке

Избыточное образование свободных радикалов в организме, или окислительный (оксидативный) стресс, вызванный воздействием КВЧ-излучения, в последнее время рассматривается некоторыми авторами как один из основных механизмов биологической активности радио- и микроволн [30, 31]. Известно, что водорастворимая флуоресцентная молекула Амплекс красный (AR) сравнительно устойчива в буфере и почти не окисляется в присутствии цитохрома *c* или H₂O₂. Воспроизведенные нами экспериментальные результаты подтверждают это, а также то, что ком-

бинация цитохрома *c* и перекиси водорода вызывает заметное окисление АR. Однако в присутствии липосом, содержащих кардиолипиды (т. е. при образовании КЦ-комплексов), степень окисления АR многократно усиливается. КВЧ-излучение вызывает усиление окисления АR в присутствии цитохрома *c* и H₂O₂. Это усиление окислительной активности заметно как в присутствии разных липосом, используемых в нашем эксперименте, так и без них. Однако абсолютная величина эффекта наиболее выражена в присутствии кардиолипидов. Нам удалось показать, что КВЧ-излучение не влияет (или сравнительно мало влияет) на окислительные процессы, индуцируемые глобулярной формой цитохрома *c*. В то время как окислительная активность КЦ-комплексов на 1-2 порядка превышала активность свободного цитохрома *c* и в ещё большей степени усиливалась под действием КВЧ-излучения [32].

Предложен механизм наблюдаемого эффекта, согласно которому, КВЧ-излучение, создавая дефекты в мембранном липидном бислое за счет термотропного действия, обеспечивает проникновение внутрь липосом веществ, стимулирующих ПОЛ в мембранах клеток с соответствующими последствиями. Кроме того, в нашей работе, выполненной совместно с ФНКЦ физико-химической медицины Росздрава, измерение хемилюминесценции изолированных нейтрофилов, ресуспендированных в плазме, доказало, что усиление активации нейтрофилов при КВЧ-облучении не опосредовано другими клетками крови или тромбоцитами. Мы показали также, что КВЧ может слабо, но достоверно усиливать функциональный ответ миелопероксидазы, важного белка мембран нейтрофилов, который способен продуцировать ROS (активные формы кислорода). Таким образом, наши исследования [33] показали, что КВЧ-излучение усиливает ответ нейтрофилов на индуктор активации в цельной крови, увеличивая продукцию ROS в крови.

Учитывая, что процесс ПОЛ может участвовать в регуляции агрегационной активности тромбоцитов [34], мы предположили, что микроволновое облучение, стимулируя увеличение скорости образования свободных радикалов в обедненной тромбоцитами плазме, может регулировать агрегационную активность тромбоцитов. Кроме того, в работе саратовских ученых было установлено, что КВЧ-облучение в определенных условиях вызывает значительное ингибирование функциональной активности тромбоцитов в нативной плазме по сравнению с контролем [35]. В результате выполненной нами совместно с Медицинским университетом ГБОУ ВПО РНИМУ им. Н. И. Пирогова экспериментальной работы было установлено, что КВЧ-облучение низкой интенсивности в длинноволновой области снижало 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). Добавление в среду этанола способствовало дальнейшему снижению уровня агрегации и угла наклона агрегатограммы в зависимости от количества этанола, добавленного в среду инкубации. Предложен механизм наблюдаемого эффекта, связанный с тем, что этанол индуцирует митохондриально-опосредованный внутренний апоптоз тромбоцитов и приводит к снижению количества циркулирующих тромбоцитов. КВЧ-излучение за счет влияния на водную среду и структуру мембран тромбоцитов ускоряет этот процесс [36]. Результаты работы открывают перспективы применения КВЧ-излучения как безопасного фактора воздействия с целью коррекции патологий реологических свойств крови человека, и в частности при алкогольной интоксикации.

Следует отметить, что в данном эксперименте мы исследовали влияние КВЧ-излучения на агрегацию тромбоцитов на фоне действия индуктора агрегации – ристомидина. Опыт нашей экспериментальной работы [37], а также известные литературные данные [38] свидетельствуют о том,

что действие КВЧ низкой интенсивности особенно эффективно в сочетании с другими физико-химическими факторами. В следующем исследовании мы использовали комбинированное действие КВЧ-излучения и известного апоптотического стимула клеток – актиномицина *D* [39]. Мы предположили, что если клетки находятся под воздействием стрессовых факторов, дополнительных к микроволновому излучению, то последнее может дать аддитивный (или синергичный) вклад. Онкологические клетки (HL-60) обрабатывали актиномицином *D* (цитостатический препарат из группы противоопухолевых антибиотиков) в концентрации 0,5 мкг/мл в течение 8 ч при температуре 37 °С в условиях КВЧ-облучения. Оказалось, что излучение само по себе практически не влияет на выживаемость нативных клеток, однако смертность клеток, обработанных актиномицином *D*, в условиях КВЧ-облучения увеличивалась в полтора раза. К приведенному списку успешного использования КВЧ-излучения в комбинации с другими физико-химическими факторами следует добавить и приведенные выше эксперименты УФ-фотолиза дрожжей, липосом. Кроме того, КВЧ-облучение цельной крови не вызывало активации нейтрофилов, но усиливало радикально генерирующую способность активированных нейтрофилов, когда агонист добавляли к крови до КВЧ-облучения [33]. На эти особенности биологической чувствительности КВЧ-излучения следует обратить внимание при выработке гигиенических норм данного вида излучения в период освоения стандартов 6G, когда КВЧ-излучение будет особенно интенсивно использоваться в быту [40]. Изучение вопроса совместного действия микроволнового излучения и других факторов физико-химической природы на биообъекты должно быть непременно продолжено. К тому же следует отметить, что механизмы, с помощью которых КВЧ-излучение способно производить системные эффекты всего организма при локальных воздействиях, где проникновение осуществляется на небольшую глубину, до сих пор недостаточно изучены. Эта ситуация таит в себе, с одной стороны, нераскрытые возможности КВЧ-терапии, а с другой – возможную опасность для здоровья людей при использовании данного вида излучения.

В заключение хотелось бы отметить, что в процессе нашей работы, в результате адаптации известных, создавались новые биофизические методы и приборы, некоторые из которых защищены патентами, позволившие эффективно проводить исследования биологической чувствительности КВЧ-излучения [41] и которые могут быть использованы в работах других исследователей.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт работы коллектива, возглавляемого академиком Н. Д. Девятковым, показал эффективность универсального подхода к проблеме создания нового направления – медико-биологических исследований от первоначальной идеи до масштабного внедрения в медицинскую практику. Содружество ученых-физиков, приборостроителей, биологов, медиков преподавателей и клиницистов позволило в реальные сроки организовать благоприятную среду для выпуска приборов и создания методик диагностики и лечения с помощью КВЧ-излучения низкой интенсивности.

Продолжение исследований в данном направлении вызвано необходимостью расширения сферы применения КВЧ-излучения в различных областях медицины, а также учета электромагнитного воздействия как экологического фактора [42].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Девятков, Н. Д.** Воспоминания / Н. Д. Девятков. – М.: ЗАО ИПРЖР, 1998. – 160 с.
2. Серия широкополосных генераторов малой мощности миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / М. Б. Голант, Р. Л. Виленская, Е. А. Зюлина [и др.] // ПТЭ. – 1965. – № 4. – С. 136 – 139.
3. Влияние миллиметровых волн на микрофлору воздуха помещения / В. Г. Адаменко, Р. Л. Виленская, М. Б. Голант [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1966. – № 12. – С. 132 – 136.
4. **Кондратьева, В. Ф.** Действие радиоволн на микрофлору воздуха / В. Ф. Кондратьева, Е. Н. Чистякова // Ферменты в экспериментальной и клинической онкологии и радиобиологии: труды Ленинградского химико-фармацевтического института. – 1967. – Т. 20, ч. 1. – С. 88 – 90.
5. / В. Ф. Кондратьева, Е. Н. Чистякова, Н. Б. Иванова, А. Д. Казанская // Ферменты в экспериментальной и клинической онкологии и радиобиологии: труды Ленинградского химико-фармацевтического института. – 1967. – Т. 20, ч. 1. – С. 83 – 87.
6. Миллиметровые волны и фотосинтезирующие организмы: монография / под ред. Ю. В. Гуляева и А. Х. Тамбиева. – М.: Радиотехника, 2003. – 175 с.
7. **Webb, S. J.** Inhibition of bacterial cell growth by microwaves / S. J. Webb, P. P. Dodds // Nature. – 1968. – Vol. 218. – P. 374 – 375.
8. **Webb, S. J.** Absorbtion of microwaves by microorganisms / S. J. Webb, P. P. Dodds // Nature. – 1969. – Vol. 222. – P. 1199 – 1200.
9. **Севастьянова, Л. А.** Комбинированное воздействие рентгеновского и СВЧ-излучений на костный мозг / Л. А. Севастьянова, С. Л. Потапов // Научные доклады высшей школы. Биологические науки. – 1969. – № 6. – С. 46 – 48.
10. **Девятков, Н. Д.** Успехи физических наук / Н. Д. Девятков – Т. 110, № 3. – С. 453 – 455.
11. **Девятков, Н. Д.** Особенности медико-биологического применения миллиметровых волн / Н. Д. Девятков, М. Б. Голант, О. В. Бецкий. – М.: Из-во ИРЭ АН СССР, 1994. – 164 с.
12. **Schwan, H. P.** Nonthermal cellular effects of electromagnetic fields: AC-field induced ponderomotoric forces / H. P. Schwan // Br. J. Cancer. Suppl. – March 1982. – Vol. 5. – P. 220 – 224.
13. **Khizhnyak, E. P.** Temperature oscillations in liquid media caused by continious (nonmodulated) millimeter wavelength electromagnetic irradiation / E. P. Khizhnyak, M. C. Ziskin // Bioelectromagnetics. – 1996. – Vol. 17. – P. 223 – 229.
14. **Аксенов, С. И.** Вода и ее роль в регуляции биологических процессов / С. И. Аксенов. – М.: Наука. АН СССР, 1990. – 118 с.
15. / Ю. А. Владимиров, Д. И. Рошупкин, А. Я. Потапенко, А. И. Деев // Биофизика. – М.: Медицина, 1983. – 272 с.
16. **Hasted, J. B.** Aqueous dielectrics / J. B. Hasted. – London: Chapman and Hall, 1973. – 289 p.
17. **Afsar, M. V.** / M. V. Afsar, J. R. Hasted // J. Opt. Soc. Am. – 1977. – Vol. 67. – P. 902 – 913.
18. The role of strong energy absorption by water in the mechanism of biological effects of millimeter wave irradiation / I. G. Polnikov, K. D. Kazarinov, V. S. Sharov, A. V. Putvinsky // Journal of Bioelectricity. – 1987. – Vol. 6, No 2. – P. 230.
19. **Полников, И. Г.** Исследование КВЧ-поглощения биологических растворов и препаратов методом фотоакустической спектроскопии / И. Г. Полников, В. В. Герасимов, К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2009. – № 4. – С. 59 – 65.
20. **Frohlich, H.** / H. Frohlich // International J. Quantum Chem. – 1968. – Vol. 2. – P. 641 – 649.
21. **Казаринов, К. Д.** Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности / К. Д. Казаринов // Итоги науки и техники. Сер. Биофизика. – 1990. – Т. 27. – 102 с.
22. Влияние непрерывного миллиметрового излучения низкой интенсивности на транспорт ионов в коже лягушки / К. Д. Казаринов, В. С. Шаров, А. В. Путвинский, О. В. Бецкий // Биофизика. – 1984. – Т. 29, № 3. – С. 480 – 482.
23. **Kazarinov, K. D.** Convective mechanism of millimeter wave irradiation effects on membrane transport / K. D. Kazarinov, V. S. Sharov, A. V. Putvinsky // Journal of Bioelectricity. – 1987. – Vol. 6, No 2. – P. 233.

24. **Kazarinov, K. D.** Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation / K. D. Kazarinov, A. V. Putvinsky, V. S. Malinin // *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine: Plenum Publishing Corporation*. N.Y. 1999. – P. 441 – 444.
25. Ускорение перекисного окисления липидов под действием электромагнитного излучения мм-диапазона / В. С. Шаров, К. Д. Казаринов, В. Е. Андреев // *Биофизика*. – 1983. – Т. 23. – С. 146 – 147.
26. **Борисенко, Г. Г.** Биологические мембраны – первичные мишени рецепции электромагнитных полей в медико-биологическом эксперименте / Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // *Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника*. – 2007. – № 4 (492). – С. 25 – 37.
27. Dynamics associated with spontaneous differentiation of ovarian stem cells *in vitro* / S. Parte [et al.] // *J. Ovarian Res.* – 2014. – No 7. – P. 25.
28. Intracellular thermometry with fluorescent sensors for thermal biology / K. Okabe, R. Sakaguchi, B. Shi, S. Kiyonaka // *Pflugers Arch.* – 2018. – Vol. 470, No 5. – P. 717 – 731.
29. **Казаринов, К. Д.** Исследование поглощения микроволнового излучения тонким полиэтиленовым капилляром, заполненным суспензией липосом / К. Д. Казаринов, А. В. Летяева, И. Г. Полников // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2013. – № 1 (516). – С. 48 – 54.
30. Therapeutic approaches of melatonin in microwave radiations induced oxidative stress mediated toxicity on male fertility pattern of Wistar rats / R. Meena, K. Kajal, J. Kumar [et al.] // *Electromag. Biol. Med.* – 2014. – Vol. 33. – P. 81 – 91.
31. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation / I. Yakymenko, O. Tsybulin, E. Sidorik [et al.] // *Electromag. Biol. Med.* – 2016. – Vol. 35. – P. 186 – 202.
32. **Казаринов, К. Д.** Влияние ЭМИ низкой интенсивности, микроволнового диапазона на окислительные процессы в клетках / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2018. – Вып. 1 (536). – С. 60 – 68.
33. Изучение механизма действия микроволнового излучения в КВЧ-диапазоне на клетки цельной крови / К. Д. Казаринов, И. И. Власова, Е. В. Михальчик [и др.] // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 52 – 59.
34. **Шаталина, Л. В.** Перекисное окисление липидов как механизм регуляции агрегационной активности тромбоцитов / Л. В. Шаталина // *Кардиология*. – 1993. – Т. 10. – № 33.1. – С. 25 – 28.
35. Information ENF-interactions in a system of live objects (human platelets) / V. F. Kirichuk, A. V. Maïborodin, M. V. Volin [et al.] // *Tsitologiya*. – 2001. – 43(12). – P. 1115 – 1122.
36. Антиагрегантная эффективность микроволнового излучения / А. В. Чеканов, В. А. Щелконогов, О. А. Баранова [и др.] // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2022. – № 2 (553). – С. 90 – 95.
37. **Казаринов, К. Д.** Особенности реакции клеток крови на микроволновое излучение / К. Д. Казаринов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2021. – № 3 (550). – С. 42 – 48.
38. Биологический эффект ЭМИ КВЧ определяется функциональным статусом клеток / А. А. Аловская, А. Б. Гапеев, А. Г. Габдулхакова [и др.] // *Вестник новых медицинских технологий*. – 1998. – Т. IV. – № 2. – С. 11 – 15.
39. **Борисенко, Г. Г.** Микроволновое излучение повышает чувствительность онкологических клеток к апоптотическим стимулам / Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2022. – № 1 (552). – С. 70 – 76.
40. **Sacco, G.** Age-dependence of electromagnetic power and heat deposition in nearsurface tissues in emerging 5G bends / G. Sacco, S. Pisa, M. Zhadobov // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – P. 3983.
41. **Казаринов, К. Д.** Комплекс методов и приборов для изучения электромагнитной чувствительности биологических объектов / К. Д. Казаринов // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2020. – № 2. – С. 5 – 14.
42. How safe is the environmental electromagnetic radiation? / S. Kottou, D. Nikolopoulos, E. Vogianis [et al.] // *Journal of Physical and Biophysics*. – 2014. – Vol. 4. – P. 146.

Статья поступила 31 января 2023 г.

ИСТОРИЯ

УДК 9

МИХАИЛ БОРИСОВИЧ ГОЛАНТ (к 100-летию со дня рождения)

З. Т. Алексеенко

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

MIKHAIL BORISOVICH GOLANT (to the 100-th anniversary of the birth)

Z. T. Alexeenko

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



М. Б. Голант
(1923 – 2001 гг.)

Михаил Борисович Голант – выдающийся учёный, доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской премии, Государственной премии СССР, Государственной премии Российской Федерации, «Почетный радист России», ветеран Великой Отечественной войны, орденосец, автор 350 научных работ и более 100 изобретений.

Михаил Борисович Голант родился 3 февраля 1923 года в Ленинграде в семье служащих. В 1930 году семья переехала в Москву. Отец Михаила Борисовича был известным химиком, мать – врачом. Несмотря на трудные годы, родители делали всё возможное, чтобы сыновья получили высшее образование. Об уникальности семьи Голантов говорит тот факт, что все дети: родной брат Михаила Борисовича, его двоюродные братья и сестра, как и он, стали докторами наук.

В 1940 году М. Б. Голант поступил в Московский энергетический институт, где успел проучиться только один год. Уже 22 июня 1941 года восемнадцатилетний студент был призван в армию и направлен в Златоуст, в военное училище, где он получил специальность сапёра. Михаил Борисович защищал Родину от начала Великой Отечественной войны до её победного окончания. Его боевой путь проходил через Волхов, Ленинград, Остров, Ригу, Муданьцзян (в августе 1945 года там развернулось самое жестокое и кровопролитное сражение на всем Дальневосточном фронте), Пхеньян. Судьба выбрала ему непростую военную профессию, где, помимо бесстрашия, необходимо было иметь светлую голову и изобретательность. Но полностью избежать опасности всё же не удалось. Под Ленинградом Михаил Борисович был трижды ранен, но вновь и вновь возвращался в строй. Михаил Борисович Голант начал войну рядовым красноармейцем, а закончил старшим техником-лейтенантом. Михаил Борисович был храбрым воином, и командование по достоинству оценило

его ратные заслуги. Он был награждён двумя орденами Красной Звезды, медалями «За оборону Ленинграда», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 гг.», «За победу над Японией».

В апреле 1946 года Михаил Борисович Голант был демобилизован из армии и продолжил учёбу в родном институте – МЭИ, который закончил в 1951 году с красным дипломом. Уже в институте у Михаила Борисовича проявилось желание к научному поиску. Среди студентов он отличался тем, что всегда старался найти оригинальное решение математических и физических задач. При распределении его должны были направить на работу в Новосибирск. Однако его учитель и научный руководитель дипломной работы Н. Д. Девятков, по достоинству оценив талант молодого человека и его склонность к исследовательской работе, настоял на переводе его во Фрязино, в НИИ-160, где в те годы решались важнейшие проблемы разработки СВЧ-приборов для создания новейших систем радиолокационного вооружения.

В НИИ-160 (так в то время назывался «Исток») свою трудовую и научную деятельность Михаил Борисович начал под руководством С. А. Зусмановского. Выдающееся качество исследователя – идти своим путём – Михаил Борисович пронёс через все годы жизни. Особенно остро это качество проявилось у Михаила Борисовича при работе в отделе 170. Ему было по силам как решение глубоких теоретических задач, так и разработка уникальных СВЧ-приборов. И всегда он старался найти свой оригинальный путь решения проблем, всеми силами противился копированию чужого, тем более иностранного. Как правило, на этом пути встречались большие трудности, и, чтобы доказать свою правоту, ему приходилось преодолевать их с фанатичной настойчивостью и упорством. Успешно защитив в первые же годы работы в НИИ-160 кандидатскую диссертацию, Михаил Борисович возглавил одно из важнейших научно-технических направлений по созданию СВЧ-генераторов с широкой электрической перестройкой частоты, без которых невозможно создание помехозащищённых РЛС, систем связи, станций радиоразведки и радиопротиводействия, радиовысотометров и т. д.

Выдающимся достижением конца 50-х годов стало создание М. Б. Голантом отражательных клистронов с диапазоном электронной настройки до 10 %, что позволило решить актуальную в те годы проблему помехозащищённости радиолокационных систем. С необходимостью дальнейшего расширения диапазона электрической перестройки частоты связаны последующие работы М. Б. Голанта в области ламп обратной волны (ЛОВ). Начатые в см-диапазоне длин волн, они нашли свое продолжение в мм- и субмм-диапазонах. Идеи Михаила Борисовича по разработке ЛОВ субмм-диапазона были реализованы Александром Андреевичем Негиревым при разработке ЛОВ терагерцового диапазона. Им был создан ряд широкополосных ЛОВ с магнитной фокусировкой (не имеющих аналогов в мире), перекрывающих диапазон длин волн вплоть до 0,2 мм. Создание этих приборов позволило нашей стране занять лидирующее положение в мире в области освоения мм- и субмм-диапазонов. На их основе была разработана разнообразная радиоэлектронная аппаратура и решены важнейшие научно-технические проблемы. Результаты работы в области СВЧ-генераторов с широкой электрической перестройкой частоты были обобщены М. Б. Голантом в его докторской диссертации (1961 г.).

Бурный прогресс в освоении мм- и субмм-диапазонов был обусловлен решением сложнейших проблем технологии ЭВП СВЧ по инициативе М. Б. Голанта и при его непосредственном, часто решающем, участии. В первую очередь сюда относится предложение М. Б. Голанта, Б. И. Ставицкого и Ю. А. Шевелёва использовать электроискровую обработку металлов и сплавов, что решило проблему создания высокочастотных сверхминиатюрных элементов и узлов ЭВП.

Большой вклад М. Б. Голант внёс также в создание высокоэмиссионных катодно-подогревательных узлов с плотностями тока до сотен ампер на 1 см^2 , методов химической очистки миниатюрных замедляющих систем, а также в решение ряда других проблем. Эти работы на долгие годы стали основой разработок и производства электровакуумных приборов СВЧ в широком спектре рабочих частот и уровней выходной мощности.

В основополагающих трудах М. Б. Голанта рассмотрены важнейшие преимущества миниатюрных вакуумных приборов, проблемы оптимизации их параметров и обоснование путей их практической реализации на базе достижений мм- и субмм-технологий. Результаты этих работ стали основой оригинального научно-технического направления. Большими научными и производственными коллективами проводились НИР и ОКР в области создания миниатюрных и сверхминиатюрных ЭВП СВЧ. Данные исследования позволили разработать десятки типов радиоэлектронных устройств различного назначения, не уступающих лучшим зарубежным аналогам, созданным на твердотельной элементной базе. М. Б. Голантом и его сотрудниками наряду с разработкой идеологии и решения общих вопросов миниатюризации ЭВП СВЧ были созданы оригинальные отечественные приборы «Минитроны» – сверхминиатюрные отражательные клистроны с массой до 10 г и низким (всего несколько десятков вольт) питающим напряжением. Проводились исследования по созданию принципиально новых компьютеров с высочайшим быстродействием на основе сверхминиатюрных ЛОВ на «острийных» катодах. Кроме того, в лаборатории М. Б. Голанта проводились исследования сверхпроводимости (при охлаждении до температуры жидкого гелия добротность резонатора из ниобия достигала $3,3 \cdot 10^9$).

С 1965 года, используя ЛОВ миллиметрового диапазона с широкой перестройкой частоты, разработанные М. Б. Голантом, на нашем предприятии, в других институтах и клиниках страны начинаются исследования воздействия малоинтенсивных электромагнитных колебаний на живые биологические объекты. Большое внимание к этим работам проявил академик Н. Д. Девятков. Зародилось новое научное направление, одним из основоположников которого стал М. Б. Голант. Под его руководством были разработаны терапевтические аппараты типа «Явь» на основе твердотельных генераторов мм-диапазона. Развитию этого направления М. Б. Голант посвятил последующие десятилетия своей жизни. Его публикации в медицинских журналах помогли медикам разобраться в сути процессов, происходящих в организме человека под воздействием КВЧ-излучения. Исследования, проводимые совместно с рядом медицинских организаций, доказали, что воздействие модулированных по частоте малоинтенсивных мм-волн на человека при различных заболеваниях (таких, как язва желудка и двенадцатиперстной кишки, трофические язвы, травмы мягких и костных тканей, ишемическая болезнь сердца, и ряда других) приводит к ускорению излечения. Проводились исследования воздействия СВЧ-излучения на зерновые культуры, животных и кровь человека для диагностики заболевания.

Велик вклад М. Б. Голанта в воспитание научных кадров. Более двух десятилетий под его руководством работал научный семинар, на котором обсуждались важнейшие проблемы развития СВЧ-электроники, конкретные конструкции создаваемых приборов, возможности их практического применения. Атмосфера поиска истины, жаркие научные споры – без этого не проходило ни одно заседание семинара. Под руководством М. Б. Голанта были успешно защищены около двух десятков диссертаций.

При чтении статьи может сложиться впечатление, что Михаила Борисовича окружали только добрые и заботливые люди, стремившиеся создать ему все условия для успешного решения возникающих задач. Такие люди, безусловно, были. В первую очередь это относится к академику

Н. Д. Девяткову, постоянное дружеское участие которого в судьбе М. Б. Голанта часто оказывало решающее влияние на постановку той или иной работы, ход исследований (Николай Дмитриевич ушёл из жизни буквально за несколько дней до кончины Михаила Борисовича). Но среди окружения М. Б. Голанта были и другие люди. Сколько гражданского мужества, необычайной твёрдости и веры в правоту своего дела потребовала жизнь от Михаила Борисовича при решении научных и производственных проблем. Он упорно шёл к намеченной цели, чтобы принести людям максимум пользы, делал для этого всё возможное, а часто и невозможное, не обращая внимания на противодействие недоброжелателей. Вот где пригодилась закалка бывшего сапёра!

Михаил Борисович был выдающимся учёным, но это не мешало ему в быту оставаться простым в общении и безотказным человеком. Он с радостью оказывал помощь любому сотруднику, всегда находил время для обучения тонкостям обращения с СВЧ-приборами молодых специалистов, техников, рабочих. Много лет М. Б. Голант преподавал во втузе, филиале МИРЭА на предприятии. С глубоким почтением отзываются о нём его бывшие воспитанники и ученики. Он искренне уважал молодых людей, посвятивших себя служению науке.

В семейной жизни Михаил Борисович Голант тоже был примером для подражания. Он всю жизнь с любовью относился к своей супруге Людмиле Евгеньевне, много лет проработавшей ведущим инженером-технологом в НПК-2, своим детям, внукам, правнукам.

Скончался Михаил Борисович Голант 7 февраля 2001 года. Он «сгорел» на работе, до конца отдав служению науке и технике все свои физические, духовные и моральные силы. В нашей памяти всегда будет храниться облик настоящего учёного, стремящегося познать природу и человека, – Михаила Борисовича Голанта.

Статья поступила 23 января 2023 г.

=== **НОВЫЕ КНИГИ** ===

АРТЕМОВ М.Л., БОРИСОВ В.И., МАКОВИЙ В.А., СЛИЧЕНКО М.П.
Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения.
Монография / Под ред. М.Л. Артемова. – М.: РАДИОТЕХНИКА, 2021. – 556 с.

Изложены основные аспекты создания современных автоматизированных систем управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы и сформулированы основные направления развития данных систем на ближайшее десятилетие. Рассмотрена методология оценки помехозащищенности и разведзащищенности систем радиосвязи, основанная на вероятностно-временной модели их функционирования в условиях радиоэлектронной борьбы. Проанализированы вопросы информационного обеспечения систем радиоэлектронной борьбы с помощью современной аппаратуры радиоразведки с учетом ее технологического развития за последнее десятилетие. Особое внимание уделено изложению современных способов обнаружения и пеленгования источников радиоизлучений в условиях насыщенной электромагнитной обстановки.

Книга может быть полезна широкому кругу читателей: ученым, военным специалистам, преподавателям, а также аспирантам и студентам ВУЗов, обучающимся по соответствующим материалам книги специальностям.

**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 опубликования (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 10.3.2023 г.
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.
г. Фрязино

Усл. п. л. 9
Уч.-изд. л. 9,5
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
8 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. 1(557), с. 1-74

Подписной индекс 36292

