# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

# СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 3 (530)

2016

3(530).indd 1 04.10.2016 14:49:54

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

**Выпуск 3(530)** **2016** **Издается с 1950 г.**

*Главный редактор*
д.т.н. **А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*),
к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*),
к.т.н. **В.И. Бейль**, **Ю.А. Будзинский**, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**,
**Б.Ф. Горбик**, д.т.н. **А.Д. Закурдаев**, к.т.н. **Н.П. Зубков**,
д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **А.С. Котов**,
д.т.н. **П.В. Куприянов**, к.т.н. **В.Г. Лапин**,
д.т.н. **М.И. Лопин**, д.т.н. **Н.А. Лябин**, **В.М. Малыщик**,
д.т.н., профессор **П.П. Мальцев** (ИСВЧ ПЭ РАН), к.т.н. **П.М. Мелешкевич**,
д.т.н., профессор **В.П. Мещанов** (ОАО «ЦНИИИА»),
к.т.н. **А.Г. Михальченков** (МКУ «Дирекция Наукограда» г. Фрязино),
д.т.н. **С.П. Морев** (ФГУП «НПП «Торий»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **В.Ю. Мякиньков**, д.ф.-м.н. **А.И. Панас** (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**, к.ф.-м.н. **С.А. Плешанов**, **Е.Н. Покровский**,
к.т.н. **О.В. Поливникова**, к.т.н. **А.В. Потапов**,
д.т.н., профессор **Р.А. Силин.**, д.т.н. **К.Г. Симонов**,
**В.П. Стебунов** (*ответственный секретарь*),
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО «НПП «Исток-Система»),
д.т.н., профессор **Н.Д. Урсуляк**

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещения и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, вновь 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», 2016 г.**

# ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

## SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

**Issue 3(530)** **2016** **Founded in 1950 г.**



*Editor-in-chief*
D.T.Sc. **A.A. Borisov**

*Editorial staff:*

C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **V.I. Beyl'**, **U.A. Budzinsky**, C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**,
**B.F. Gorbik**, D.T.Sc. **A.D. Zakurdaev**, C.T.Sc. **N.P. Zubkov**,
D.T.Sc. **S.S. Zyrin**, C.T.Sc. **A.S. Kotov**, D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**,
C.T.Sc. **V.G. Lapin**, D.T.Sc. **M.I. Lopin**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**, **V.M. Malyschik**,
D.T.Sc., professor **P.P. Maltsev** (IMWF SE RASc), C.T.Sc. **P.M. Meleshkevich**,
D.T.Sc., professor **V.P. Meschanov** (JSC «TSNIIIA»),
C.T.Sc. **A.G. Mikhalchenkov** (MBD «Directorate of the Science Town» Fryazino),
D.T.Sc. **S.P. Morev** (FSUE «RPC «Torij»), **O.A. Morozov** (JSC «RPC «Magratep»),
C.T.Sc. **V.U. Myakinkov**, D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas** (IRE named after V.F. Kotelnikov RASc),
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**, C.Ph.M.Sc. **S.A. Pleshanov**, **E.N. Pokrovsky**,
C.T.Sc. **O.V. Polivnikova**, C.T.Sc. **A.V. Potapov**, D.T.Sc., professor **R.A. Silin**,
D.T.Sc. **K.G. Simonov**, **V.P. Stebunov** (executive secretary),
D.T.Sc. **M.M. Trifonov** (JSC RPC «Istok-System»),
D.T.Sc., professor **N.D. Ursulyak**



The journal is registered by the Ministry on mass media of the Russian Federation (certificate ПИ № ФС 77-24651 date June 6, 2006).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated December 29, 2015 the scientific and technical collection «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been reincluded into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».



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

## СОДЕРЖАНИЕ


**Электровакуумные приборы**

*Галдецкий А.В., Ракова Е.А., Корепин Г.Ф., Смирнов В.А., Зубков Н.П., Лябин Н.А., Парамонов В.С., Дерябкин А.В., Куликов Е.Н., Духновский М.П.* – Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ *W*-диапазона..... 8

*Вагин А.И., Ефремова М.В., Иванов И.М., Курушин А.А., Скрипкин Н.И.* – Расчет и экспериментальное исследование прототипа излучателя ФАР на синхронизированных магнетронах 3-мм диапазона..... 14

*Васильев В.И.* – Электродинамическая модель перестройки частоты. цилиндрического резонатора квантового водородного генератора с помощью петли с варикапом 20

*Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. Расчет характеристического сопротивления резонатора..... 31

*Симоненко Л.В., Симоненко А.Н.* – Направленный ответвитель как способ оптимизации режима работы магнетрона..... 40

**Твердотельная электроника**

*Максимов Н.А., Панас А.И.* – Малогабаритный сверхширокополосный генератор хаоса СВЧ-диапазона на биполярном SiGe-транзисторе..... 46

*Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Гринберг Д.С., Абакумова Н.В.* – Тепловой анализ работы мощной ГИС СВЧ-диапазона..... 53

**Радиоэлектронные устройства**

*Куприянов П.В., Обрезан О.И., Трофимов Д.С.* – Об апостериорной оценке надежности сложных радиоэлектронных устройств СВЧ..... 62

*Карасев М.С., Жерновенков В.А.* – Конструктивные особенности ППМ «Аббат-И» с применением поверхностного контактного соединителя для передачи СВЧ-энергии и НЧ-сигналов управления и электропитания..... 71





3(530).indd 4 04.10.2016 14:49:54

*Гармаш С.В., Кищинский А.А., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А.* – Двухканальный волноводный сумматор мощности в *X*-диапазоне длин волн..... 81

*Данилин Н.С., Булаев И.Ю.* – Система искусственного интеллекта на борту космических аппаратов..... 88

**Технология и материаловедение**

*Калашников Ю.Н., Литвиненко Н.П., Ранжин Ю.С.* – Автоматические установки в процессах сборки многофункциональных модулей..... 92

*Курочкин А.А.* – Методология изготовления прецизионных тонкостенных изделий сверхмалого размера..... 97

*Ваганов И.И., Вашин С.А., Корепин Г.Ф.* – Выбор способа сварки малогабаритных клистронов..... 103

**Производственно-технический опыт**

*Цай П.И., Яковлев С.В., Рокитянский А.Г., Городецкая М.В., Горшкова Е.С., Ланцов Ю.С., Ширяев Д.А.* – Организация системы аттестации испытательного оборудования по предприятию..... 108



3(530).indd 5 04.10.2016 14:49:54

## CONTENTS


**Electrovacuum devices**

*Galdetsky A.V., Rakova E.A., Korepin G.F., Smirnov V.A., Zubkov N.P., Lyabin N.A., Paramonov V.S., Deryabkin A.V., Kulikov E.N., Dukhnovsky M.P.* – Designing and exploring of fabrication technology of perspective slow-wave structure for *W*-band TWT..... 8

*Vagin A.I., Efremova M.V., Ivanov I.M., Kurushin A.A., Scripkin N.I.* – The calculation and experimental investigation of phased array radiator prototype on 3 mm range synchronized magnetrons..... 14

*Vasilyev V.I.* – Electrodynamic modelling of tuning hydrogen maser cylindrical cavity by means of loop with a varicap..... 20

*Kalina V.G., Budzinsky U.A., Bykovsky S.V.* – Cyclotron protective unit. Calculation of resonator characteristic impedance..... 31

*Simonenko L.V., Simonenko A.N.* – Directional coupler as a method of optimizing the magnetron mode of operation..... 40

**Solid-state electronics**

*Maximov N.A., Panas A.I.* – Small-size superwideband microwave chaos oscillator on bipolar SiGe transistor..... 46

*Iovdalsky V.A., Ganyushkina N.V., Grinberg D.S., Abakumova N.V.* – The thermal analysis of power microwave HIC operation..... 53

**Radioelectronic devices**

*Kupriyanov P.V., Obrezan O.I., Trofimov D.S.* – On posterior reliability estimate of microwave complicated radio electron devices..... 62

*Karasev M.S., Zhernovenkov V.A.* – The design peculiarities of transmitter-receiver module «Abbat-И» using surface contact connector for transmitting microwave energy and low frequency signals of control and electric power supply..... 71





3(530).indd 6 04.10.2016 14:49:54

*Garmash S.V., Kishchinsky A.A., Gevorkyan V.M., Kazantsev U.A.* – Two-channel waveguide power combiner in *X*-band wavelengths..... 81

*Danilin N.S., Bulayev I.U.* – The system of artificial intelligence on board the space vehicles 88

**Techology and material science**

*Kalashnikov U.N., Litvinenko N.P., Ranzhin U.S.* – Automatic plants in the processes of assembling multifunctional modules..... 92

*Kurochkin A.A.* – Methodology of manufacturing precision thin-walled miniature products 97

*Vaganov I.I., Vashin S.A., Korepin G.F.* – Choice of the method of welding of small-sized klystrons..... 103

**Production anl engineering experience**

*Tsai P.I., Yakovlev S.V., Rokityansky A.G., Gorodetskaya M.V., Gorshkova E.S., Lantsov U.S., Shiryaev D.A.* – The arrangement of certification procedure for testing equipment at enterprise..... 108



3(530).indd 7 04.10.2016 14:49:54

# ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.632

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛБВ *W*-ДИАПАЗОНА

**А. В. Галдецкий, Е. А. Ракова, Г. Ф. Корепин, В. А. Смирнов, Н. П. Зубков, Н. А. Лябин, В. С. Парамонов, А. В. Дерябкин, Е. Н. Куликов, М. П. Духновский**

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

**Рассмотрена замедляющая система на алмазном теплоотводе для ЛБВ *W*-диапазона. Представлены расчетные характеристики: АЧХ замедления и сопротивление связи, выходная мощность, усиление. Рассмотрены вопросы технологии изготовления данной ЗС.**

*КС: ЛБВ W-диапазона, ленточный пучок, CVD-алмаз, прецизионная лазерная резка, термодиффузионная пайка*

## DESIGNING AND EXPLORING OF FABRICATION TECHNOLOGY OF PERSPECTIVE SLOW-WAVE STRUCTURE FOR *W*-BAND TWT

**A. V. Galdetsky, E. A. Rakova, G. F. Korepin, V. A. Smirnov, N. P. Zubkov, N. A. Lyabin, V. S. Paramonov, A. V. Deryabkin, E. N. Kulikov, M. P. Dukhnovsky**

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

**A slow-wave structure on a diamond heat sink for *W*-range TWT has been considered. The calculated characteristics are presented: amplitude-frequency characteristics of slowdown and interaction impedance, output power, gain. The issues of manufacturing technology of the given slow-wave structure are considered.**

*Keywords: W-range TWT, ribbon beam, CVD-diamond, precision laser cutting, thermal-diffusion soldering*

В последние годы во всем мире происходит продвижение вакуумных приборов в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны [1–6]. Однако наиболее востребованы, в том числе и в России, *Ka*- и *W*-диапазоны [7]. В работе рассмотрен проект ЛБВ *W*-диапазона с замедляющей системой (ЗС) в виде меандра, базирующийся на имеющейся технологической базе (выращивание CVD алмазных пластин с последующей металлизацией и прецизионная лазерная резка элементов ЗС).

В отличие от известных аналогичных ЗС, здесь используются подвешенная тонкая подложка из CVD-алмаза для обеспечения хорошего теплоотвода и низкой диэлектрической нагрузки, а также меандр из толстой (50 мкм) фольги, что препятствует токооседанию на диэлектрик. Схематическое изображение одного периода ЗС приведено на рис. 1.



3(530).indd 8 04.10.2016 14:49:54

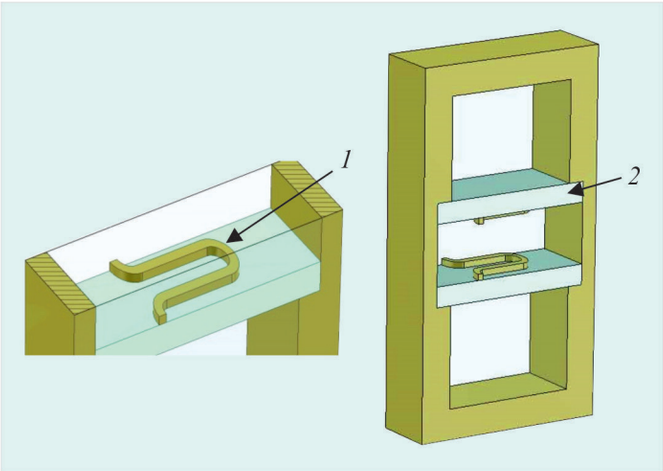



Рис. 1. Эскиз одного периода ЗС:
*1* – металлизированный меандр; *2* – алмазная подложка

Были подобраны оптимальные геометрические размеры ЗС, обеспечивающие широкую полосу пропускания и максимально возможное сопротивление связи (рис. 2, 3). Период ЗС составил 190 мкм. Толщина меандра – 50 мкм. Высота пролетного канала – 240 мкм. Рабочее напряжение пучка – 15,6 кВ.

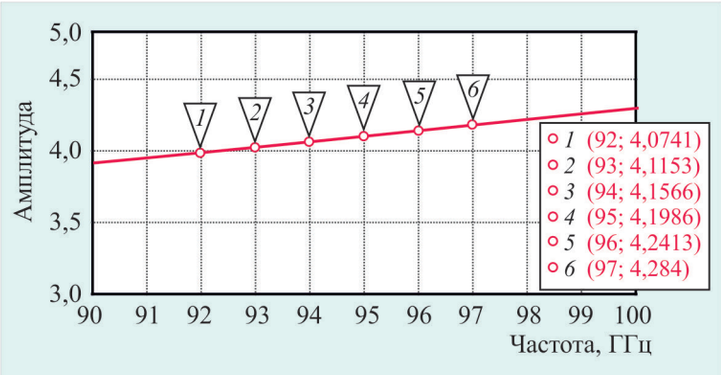



Рис. 2. АЧХ замедления в ЗС

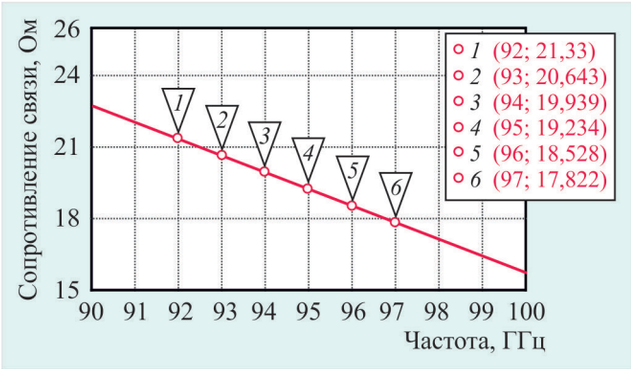



Рис. 3. Сопротивление связи ЗС



3(530).indd 9 04.10.2016 14:49:54

Для первых образцов предполагается использовать электронно-оптическую систему без компрессии и иммерсионный металлосплавной катод с высокой плотностью тока (100 А/см$^2$), используемые для субмиллиметровых ЛОВ. На рис. 4 представлены результаты моделирования электронно-оптической системы, формирующей ленточный пучок с сечением 400×108 мкм и током 43 мА.

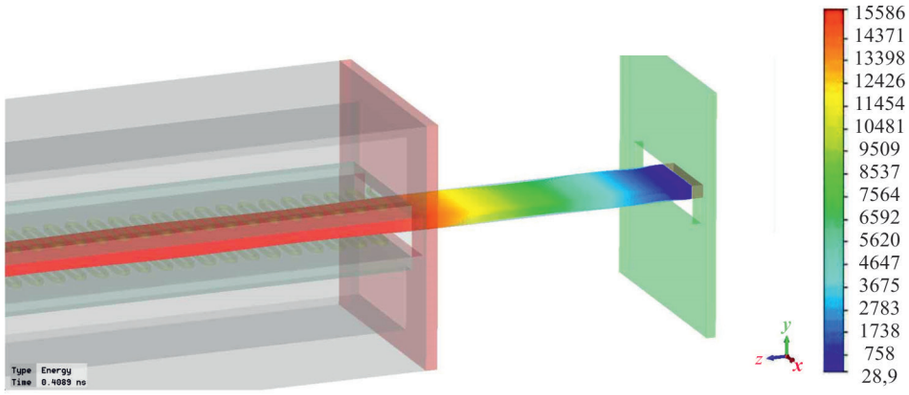



Рис. 4. Электронно-оптическая система

Фокусировка электронного потока осуществляется магнитной системой на постоянных магнитах, обеспечивающей магнитное поле 0,8 Тл. Превышение величины магнитного поля в 8,8 раз по сравнению с бриллюэновским дает возможность «заморозить» ленточный пучок в канале, что позволяет избежать известной проблемы *S*-образного загиба краев (рис. 5).

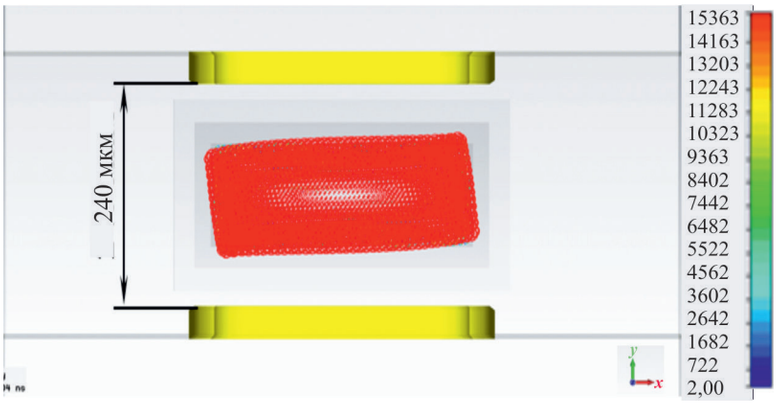



Рис. 5. Прохождение ленточного пучка в канале

Впоследствии планируется переход на более сложную оптику с экранированным катодом и компрессией пучка.

В работе рассмотрен вариант «прозрачной» ЛБВ (без поглотителя), что реализуемо при сравнительно короткой лампе и небольшом усилении (< 16 дБ). В одномерной программе по расчету взаимодействия были получены выходные характеристики лампы, представленные на рис. 6.

При длине области взаимодействия 24,6 мм, рабочем напряжении 15,6 кВ и входной мощности 1 Вт выходная мощность в полосе 5 ГГц достигает 27 Вт, что в 3 раза превышает мощность разработанной ранее лампы традиционной конструкции.



3(530).indd 10 04.10.2016 14:49:55

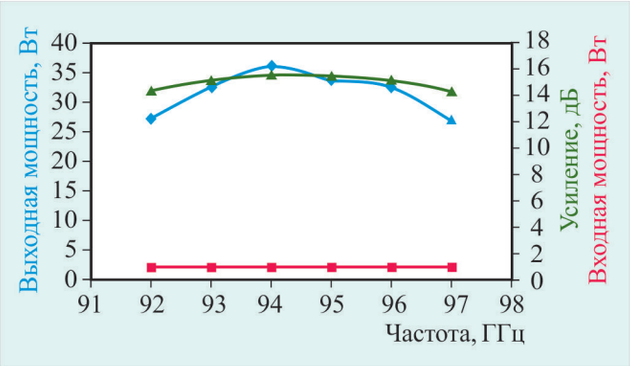



Рис. 6. Расчетные зависимости выходной мощности и усиления ЛБВ

В настоящей работе исследовалась технология изготовления данной ЗС. Основными показателями технологии являются точность изготовления и качество поверхности.

Методы создания заданного рисунка металлизации известны из техники печатных плат, однако перенос этих технологий на мелкоструктурные топологии на алмазе невозможен из-за низкой точности и специфических свойств алмаза, низкой адгезии металлической пленки и большой разницы КТР. Фотолитографические методы, применяемые при создании интегральных схем, не обеспечивают достаточной толщины металлизации для предотвращения токооседания на диэлектрик. Поэтому нами была сделана попытка создания тонкой металлизации в виде меандра на поверхности алмаза с последующей рецессией остальной поверхности алмаза. Для создания рецессии на алмазе с требуемым рисунком использовалась развитая на «Истоке» уникальная технология ионной имплантации с последующей графитизацией алмаза [8]. На рис. 7 представлена фотография нескольких периодов ЗС, изготовленной по данной технологии.

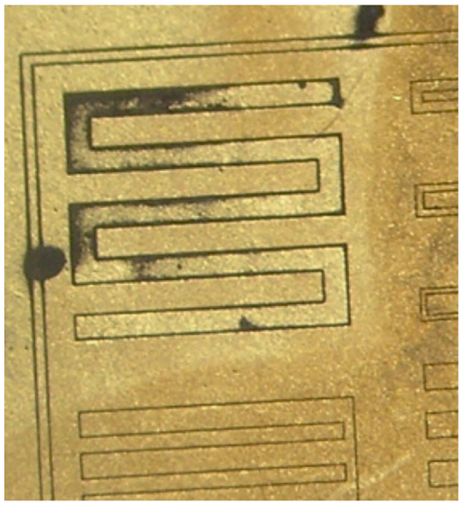


Рис. 7 . Фотография экспериментального образца подложки с двумя периодами ЗС

Разработанная технология позволяет формировать на поверхности алмазной пластины высокоадгезионную металлизацию по заданному шаблону с достаточной для создания приборов миллиметрового диапазона точностью. Однако толщина металлизации в данной технологии не превышает 5…7 мкм, что недостаточно для предотвращения оседания пучка на диэлектрик и его зарядки. К тому же качество полученной структуры оставляет желать лучшего.



3(530).indd 11 04.10.2016 14:49:55

Поэтому был рассмотрен другой технологический маршрут, который включает в себя следующие этапы:

1) изготовление меандра из фольги толщиной 50 мкм;

2) технологическая очистка меандра;

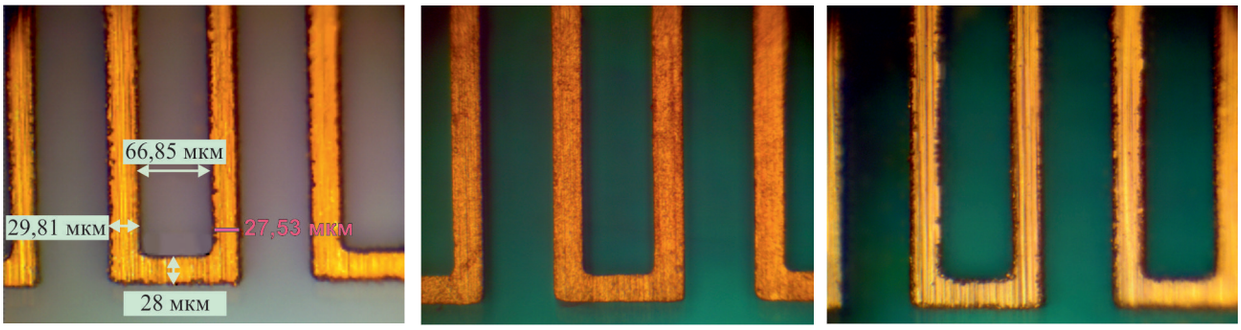
3) изготовление алмазных подложек со сплошной металлизацией золотом;

4) термодиффузионная пайка медного меандра на металлизированную поверхность алмазной подложки;

5) травление золота с поверхности алмазной подложки при использовании медного меандра в качестве маски.

Для изготовления ЗС в виде меандра выбрана технология прецизионной лазерной резки, которая хорошо освоена на «Истоке» и гарантирует точность до ±5 мкм (рис. 8, *а*).

После лазерной резки проводилась технологическая очистка. Рассматривались два варианта: химическая очистка в щелочном растворе при высокой температуре (рис. 8, *б*) и отжиг в восстановительной среде (водородная печь) (рис. 8, *в*).




*а*) *б*) *в*)

Рис. 8. Медный меандр:
*а* – после лазерной резки; *б* – после химической очистки в щелочном растворе;
*в* – после отжига в водородной печи

При сравнении результатов видно, что существенной разницы в качестве поверхности нет. Однако после отжига в восстановительной среде медные элементы ЗС становятся очень пластичными, что легко приводит к их деформации. Для дальнейшего использования был выбран вариант химической очистки.

После очистки производилась термодиффузионная пайка медного меандра и алмазной подложки, металлизированной золотом толщиной 0,5…3 мкм (рис. 9).

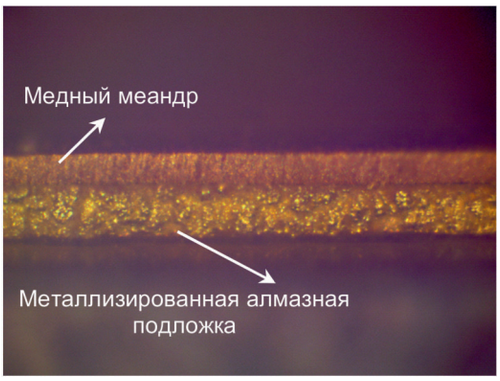



Рис. 9. Фотография спаянных медных элементов ЗС и металлизированной алмазной подложки



3(530).indd 12 04.10.2016 14:49:55

Пайка прошла успешно, без растрескивания алмаза и коробления подложки, благодаря малой толщине и благоприятной топологии меди. Травление золота осуществляется в аргоновой плазме.

Предложенная конструкция ЗС, согласно расчетам, позволяет получить высокое сопротивление связи и необходимую дисперсионную характеристику в 3-мм диапазоне длин волн с полосой рабочих частот в 5 ГГц. Использование новой конструкции позволит существенно увеличить выходную импульсную мощность при рабочем напряжении не более 15,6 кВ. Продемонстрирована технологичность и изготовляемость новой конструкции ЗС. Следует отметить высокие технологические показатели обработки (точность и качество поверхности) с помощью лазерной резки, при этом проводники ЗС сохраняют качество (плотность и сопротивление) монолитного материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Booske, J. H.** Vacuum electronic high power terahertz sources / J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye, C. L. Kory, G. R. Neil, G. S. Park, J. H. Park, R. J. Temkin // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 54 – 75.

2. **Shin, Y.-M.** Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit / Y.-M. Shin, A. Baig, L. R. Barnett, W.-C. Tsai, N. C. Luhmann, J. Pasour, P. Larsen // IEEE Trans. Electron Devices. – 2011. – Vol. 58, No 9. – P. 3213 – 3219.

3. **Shin, Y.-M.** System design analysis of a 0.22-THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier / Y.-M. Shin, A. Baig, L. R. Barnett, W.-C. Tsai, N. C. Luhmann // IEEE Trans. Electron Devices. – 2012. – Vol. 59, No 1. – P. 234 – 240.

4. **Joye, C. D.** Demonstration of a high power, wideband 220-GHz traveling wave amplifier fabricated by UV-LIGA / C. D. Joye, A. M. Cook, J. P. Calame et al. // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No 6. – P. 1672 – 1678.

5. **Jinjun, Feng.** Development of *W*-band folded waveguide pulsed TWTs / Jinjun Feng, Jun Cai, Yinfu Hu et al. // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No 6. – P. 1721 – 1725.

6. **Huarong, Gong.** Experimental investigation of a high-power *Ka*-band folded waveguide traveling-wave tube / Huarong Gong, Yubin Gong, Tao Tang et aI. // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2011. – Vol. 58, No 7. – P. 2159 – 2163.

7. **Рожнев, А. Г.** Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком / А. Г. Рожнев, Н. М. Рыскин, Т. А. Каретникова, Г. В. Торгашов, Н. И. Синицын, П. Д. Шалаев, А. А. Бурцев // Изв. вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 8–9. – С. 601 – 613.

8. **Дерябкин, А. В.** Технология создания толстопленочной металлизации алмазных пластин по заданному рисунку для нового типа ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов / А. В. Дерябкин, Е. Н. Куликов // Тезисы докладов IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ОАО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2014. – С. 31.

*Статья поступила 11 марта 2016 г.*



3(530).indd 13 04.10.2016 14:49:55

УДК 621.385.64

# РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ИЗЛУЧАТЕЛЯ ФАР НА СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАГНЕТРОНАХ 3-мм ДИАПАЗОНА

**А. И. Вагин, М. В. Ефремова, И. М. Иванов, А. А. Курушин, Н. И. Скрипкин**

*ОАО «Плутон» – ЗАО «РТИ-Радио», г. Москва*

**Приведены результаты расчета и оптимизации электродинамической системы прототипа излучателя ФАР. Система синхронизации 3-х магнетронных генераторов обеспечивает коэффициент суммирования мощности не менее 0,7 и перераспределение мощности на 4 ячейки ФАР с неравномерностью распределения по выходам не более 5 %. Представлены результаты эксперимента.**

*КС: излучатель ФАР, питание, 3 синхронизированных магнетрона*

# THE CALCULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PHASED ARRAY RADIATOR PROTOTYPE ON 3-мм RANGE SYNCHRONIZED MAGNETRONS

**A. I. Vagin, M. V. Efremova, I. M. Ivanov, A. A. Kurushin, N. I. Scripkin**

*OJSC «Pluton» – CJSC «RTI-Radio», Moscow*

**The results of calculation and optimization of electrodynamic system of phased array radiator prototype are presented. The synchronization system of 3 magnetron oscillators provides power accumulation coefficient not less than 0.7 and power redistribution to four phased array cells with power distribution nonuniformity in four outputs not more than 5 %. The results of the experiment are shown.**

*Keywords: phased array radiator, feeding, 3 synchronized magnetrons*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках проведенных ранее работ [1–5] была экспериментально определена возможность создания системы *N* синхронизированных импульсных магнетронных генераторов 3-мм диапазона, аддитивно работающих на *N*+1 нагрузку. Были рассчитаны и изготовлены синхронизирующие электродинамические структуры (мосты, тройники, системы тройников). В общем случае наличие *N*+1 синхронизированного по частоте и фазе вывода позволяет создать излучатель ФАР высокого уровня мощности с управлением режима сканирования с помощью ферритовых фазовращателей. В данной работе представлены результаты расчета и экспериментального исследования излучателя ФАР с питанием от 3-х синхронизированных магнетронов. Структурная схема объекта исследования представлена на рис.1, где *M1*, *M2*, *M3* – магнетроны.



3(530).indd 14 04.10.2016 14:49:55

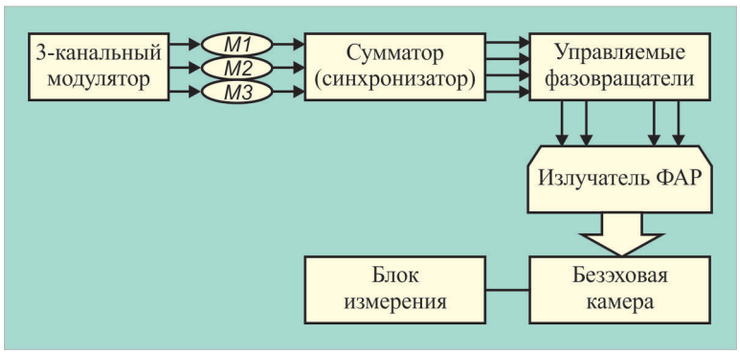



Рис. 1. Структурная схема излучателя ФАР

## 2. РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### 2.1. Сумматор

В качестве базовой схемы для суммирования и синхронизации 3-х магнетронных генераторов была выбрана схема Е. Дейвида [6] на основе волноводов сечением 2,4×1,2 мм, представленная на рис. 2.

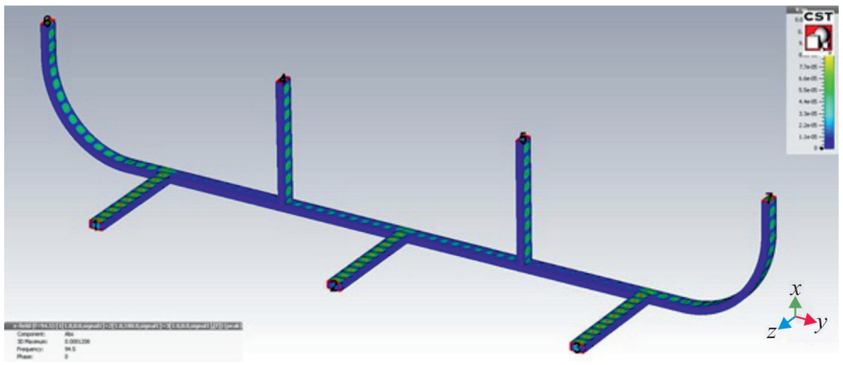



Рис. 2. Схема сумматора

Данная схема состоит из 3-х тройников *H*-типа и 2-х тройников *E*-типа, связанных между собой отрезками волноводов. При этом порты *1…3* являются входными, а порты *4…7* выходными. С помощью математического моделирования были выполнены расчет и оптимизация геометрических размеров сумматора для работы на частоте входных сигналов используемых генераторов. В результате проведения оптимизации обеспечены:

– равномерное распределение мощности на выходных портах схемы ($P_{вых1} \approx P_{вых2} \approx P_{вых3} \approx P_{вых4}$, при этом разброс $\Delta P_{вых}$ составил не более 5 %);

– необходимое равномерное распределение отраженной мощности на входных портах схемы ($P_{отр1} \approx P_{отр2} \approx P_{отр3}$, при этом разброс $\Delta P_{отр}$ составил не более 5 % при отражении Г < -10 дБ);

– необходимая рабочая полоса частот – не менее 200 МГц;

– коэффициент суммирования ($K_{сум} = \sum P_{вых} / \sum P_{вх}$) составил 0,8.

По результатам расчета было принято решение об изготовлении оптимизированного сумматора.



3(530).indd 15 04.10.2016 14:49:55

### 2.2. Излучатель фазированной решетки

В качестве прототипа ФАР была выбрана система из четырех соединенных вместе рупорных излучателей с шагом около 1,5 от длины волны в свободном пространстве. Рупорные излучатели имели прямоугольный раскрыв 5×5 мм (рис. 3). В процессе расчета были определены распределение напряженностей полей в ближней зоне (рис. 4) и диаграмма направленности в дальней зоне (рис. 5), КСВН по входам составил не хуже 1,2 в полосе частот ($F_0$ ± 1) ГГц. Рупорные излучатели сопряжены с волноводом 2,4×1,2 мм. Поляризация горизонтальная (по $Y$). В соответствии с расчетом в данной решетке реализована «ножевая» диаграмма направленности с шириной сектора сканирования по азимуту около 30 град. При этом для демонстрационного сканирования в секторе 6 град сдвиг фаз между соседними ячейками составляет около 60 град. По результатам моделирования было принято решение об изготовлении излучателя ФАР.

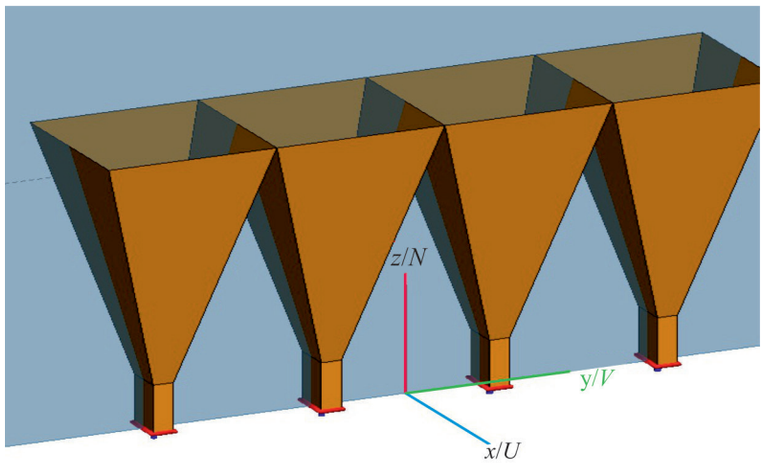



Рис. 3. Рупорные излучатели

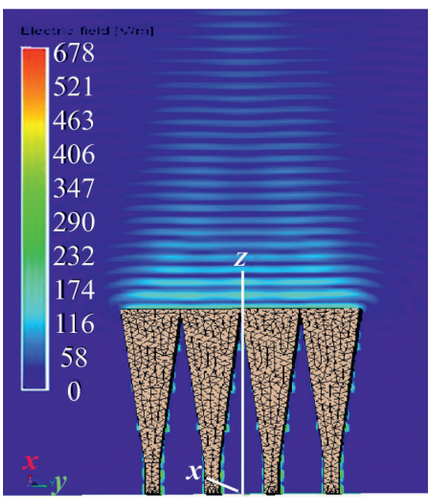



Рис. 4. Распределение напряженностей полей в ближней зоне

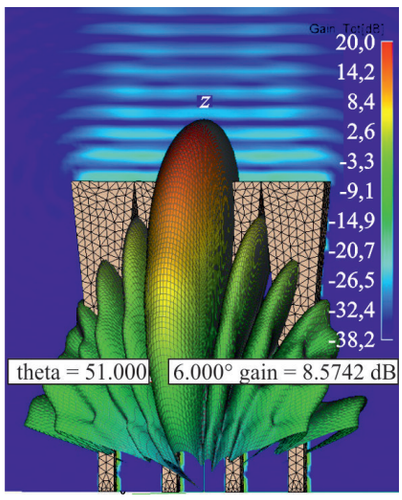



Рис. 5. Диаграмма направленности в дальней зоне



3(530).indd 16 04.10.2016 14:49:56

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ИЗЛУЧАТЕЛЯ ФАР

### 3.1. Исходные данные

Собственные частоты 3-х магнетронов: ($F_0$ – 30) МГц; ($F_0$ +10) МГц; ($F_0$ +30) МГц.
Импульсные мощности 3-х магнетронов: 6,0; 7,1; 7,6 кВт.
Длительность импульса – 200 нс.
Частота посылок – 2000 Гц.
Производитель и разработчик магнетронов – ОАО «ПЛУТОН».

### 3.2. Результаты экспериментальных работ

Экспериментальные работы проводились на стенде ЗАО «РТИ-Радио».

В процессе проведения работ были изготовлены и исследованы электродинамические структуры в соответствии с расчетными данными. Также осуществлены монтаж и пуск установки в соответствии со структурной схемой (см. рис. 1). Для диагностики была изготовлена безэховая камера (300×300×400 мм) с поглощающим покрытием 3-мм диапазона, специально разработанным в ЗАО «РТИ-Радио». Коэффициент ослабления (поглощения) составлял -40 дБ, коэффициент отражения – около -20 дБ. Камера была оснащена детекторами ВЧ-огибающей, датчиком анализатора спектра со смесителем и гетеродином, тепловизором для визуальной регистрации двухмерной проекции диаграммы направленности. Фотография установки приведена на рис. 6. Магнетроны через волноводные тракты сечением 2,4×1,2 мм подсоединялись к сумматору. С 4-х выходов сумматора через систему управляемых фазовращателей высокого уровня мощности сигналы подавались на блок излучателя ФАР. Диапазон изменения фазы на каждом из фазовращателей составлял 180 град (в реальном устройстве для обеспечения максимального сектора сканирования требуется диапазон 360 град – увеличенный в 2 раза по сравнению с используемым).

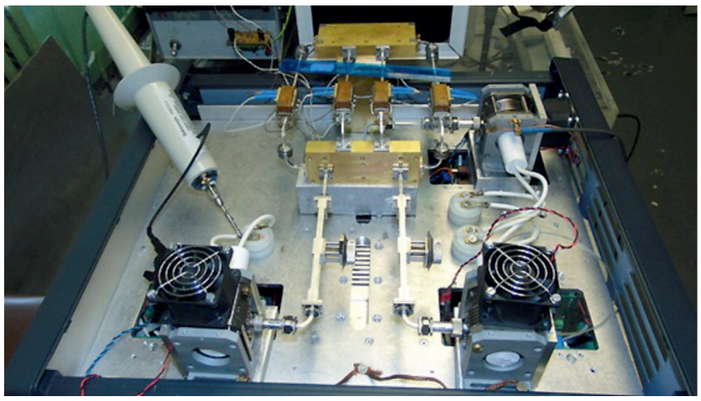


Рис. 6. Установка для проведения экспериментальных работ

Общие габаритные размеры модулятора, волноводных трактов, сумматора и излучателя могут быть значительно уменьшены по сравнению с экспериментальным прототипом.

Получены следующие результаты: синхронизированная частота – $F_0$; коэффициент суммирования – не менее 0,7; мощность на выходе сумматора – не менее 14 кВт; мощность на выходе излучателя – не менее 10 кВт; стабильность частоты – не хуже $1\times10^{-5}$; ширина сектора сканирования – в соответствии с расчетной.



3(530).indd 17 04.10.2016 14:49:56

На рис. 7 представлена осциллограмма ВЧ-огибающей (верхняя кривая – анодное напряжение магнетронов, средняя кривая – ВЧ-огибающая, нижняя кривая – ток магнетронов).

На рис. 8 представлен спектр сигнала (с учетом частоты гетеродина).

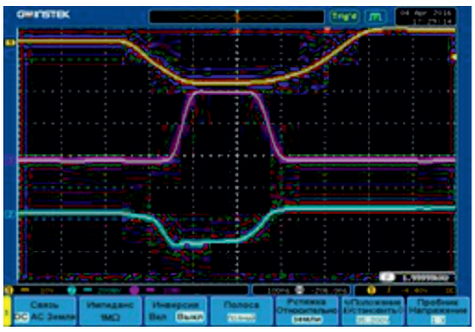


Рис. 7. Осциллограмма ВЧ-огибающей

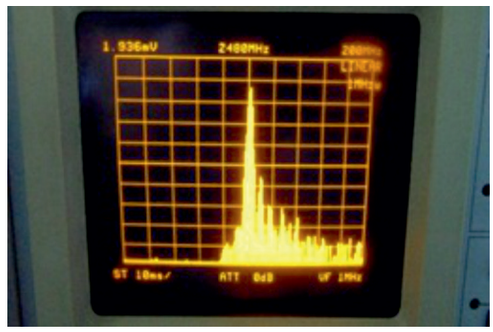


Рис. 8. Спектр сигнала

На рис. 9 представлена визуализация на тепловизоре двухмерной диаграммы направленности в безэховой камере на расстоянии 200 мм. На рис. 10 – на расстоянии 500 мм. Виден «ножевой» характер диаграммы.

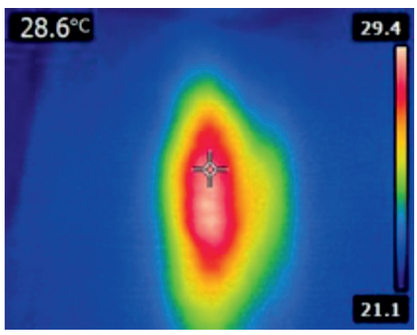



Рис. 9. Визуализация на тепловизоре двухмерной диаграммы направленности в безэховой камере на расстоянии 200 мм

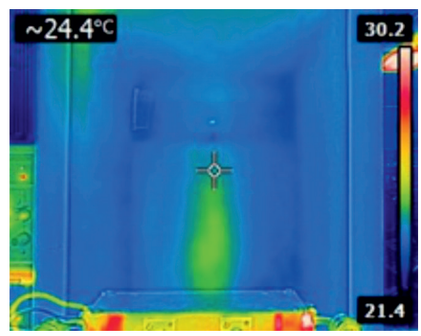



Рис. 9. Визуализация на тепловизоре двухмерной диаграммы направленности в безэховой камере на расстоянии 500 мм

Параметры установки обеспечивали стабильную непрерывную работу системы в течение не менее 3 ч.

## 4. ВЫВОДЫ

Выполнение расчетных и экспериментальных работ показало возможность создания локационной системы 3-мм диапазона с высоким уровнем мощности и реализацией режима сканирования по азимуту на синхронизированных магнетронах. Возможно применение подобных устройств в режиме «псевдокогерентности». В конструкции приемного тракта в этом случае можно использовать аналогичную излучателю структуру ФАР с применением фазового анализа приемного сигнала. Возможна перестройка сканирования от «импульса» к «импульсу». Требует решения вопрос защиты приемного тракта.



3(530).indd 18 04.10.2016 14:49:56

ЛИТЕРАТУРА

1. **Боев, С. Ф.** Экспериментальные исследования самосинхронизации магнетронов трехмиллиметрового диапазона / С. Ф. Боев, А. И. Вагин, И. М. Иванов, Н. И. Скрипкин, К. В. Ходатаев // Наукоёмкие технологии. – 2015. – Т. 16, № 5. – С. 38 – 44.

2. **Донецкий, Р. В.** Регенеративный усилитель на синхронизированных магнетронах трехмиллиметрового диапазона длин волн / Р. В. Донецкий, И. М. Иванов, Н. В. Петюшин, Н. И. Скрипкин // Наукоёмкие технологии. – 2015. – Т. 16, № 11. – С. 51 – 55.

3. **Ефремова, М. В.** Расчет и экспериментальное исследование сумматора мощности магнетронов трехмиллиметрового диапазона с выводом энергии в свободное пространство тремя когерентными излучателями / М. В. Ефремова, А. И. Вагин, И. М. Иванов, Н. И. Скрипкин, К. В. Ходатаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 3 (526). – С. 22 – 26.

4. **Иванов, И. М.** Переходные процессы при фазировании импульсных магнетронных генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн / И. М. Иванов, Н. И. Скрипкин, Н. В. Петюшин, В. А. Шашкова // II всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ-электроники». МИЭМ НИУ ВШЭ Инновационные решения (Keysight Technologies) Москва, 26 – 28 октября 2015 г.

5. **Ефремова, М. В.** Волноводные и квазиоптические способы суммирования генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн / М. В. Ефремова, И. М. Иванов, Н. И. Скрипкин // II всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ-электроники». МИЭМ НИУ ВШЭ Инновационные решения (Keysight Technologies). Москва, 26 – 28 октября 2015 г.

6. **Дейвид, Э.** Фазирование высокочастотными сигналами / Э. Дейвид; пер. под ред. М. М. Федорова // Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. – 1961. –327 с.

*Статья поступила 6 июня 2016 г.*

## НОВЫЕ КНИГИ

ГУРКО А.А. **Магнетроны миллиметрового диапазона.** – М., 2015.

В монографии рассматриваются специфические особенности режима взаимодействия электронного потока с пространственными гармониками высокочастотного поля замедляющей системы магнетрона.

Монография по содержанию и способу изложения материала предназначается для инженерно-технического персонала промышленных и научно-исследовательских предприятий, работающего в области СВЧ-техники, может быть рекомендована аспирантам и как учебное пособие студентам старших курсов высших учебных заведений.



3(530).indd 19 04.10.2016 14:49:56

УДК 621.372.413

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА КВАНТОВОГО ВОДОРОДНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ ПЕТЛИ С ВАРИКАПОМ

**В. И. Васильев**

*АО «ФНПЦ «ННИПИ «КВАРЦ» имени А.П. Горшкова», г. Нижний Новгород*

**Предложена модель, объясняющая механизм изменения частоты и добротности объемного резонатора с помощью петли с варикапом. Учтены эффекты киральности структуры. Предложены методы уменьшения изменения добротности резонатора при перестройке частоты.**

*КС:* цилиндрический резонатор, варикап, активный водородный стандарт частоты

# ELECTRODYNAMIC MODELLING OF TUNING HYDROGEN MASER CYLINDRICAL CAVITY BY MEANS OF LOOP WITH A VARICAP

**V. I. Vasilyev**

*Institute of Electronic Measurements (IEM) «KVARZ», Nizhny Novgorod*

**The model for changing the cavity frequency and quality factor by means of a loop with a varicap is proposed. The effects of structure chirality are considered. Methods to reduce the change of the cavity quality factor at frequency tuning are considered.**

*Keywords:* microwave cylindrical cavity, varicap, active hydrogen frequency standard

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Цилиндрические резонаторы на колебаниях вида $H_{011}$ традиционно применяются в квантовых активных водородных стандартах частоты и времени, обладающих среди всех промышленно выпускаемых стандартов частоты высочайшей стабильностью частоты выходного сигнала на временах усреднения от 1 с до суток.

Для тонкой перестройки частоты резонатора $f_p$ во время работы стандарта используют узел с варикапом, управляемым напряжением. Узел включает в себя варикап 3А618А-6 (с обратным смещением), петлю перестройки и конструктивный *LC*-фильтр. *LC*-фильтр играет роль развязывающего звена. Требования к узлу – достаточный диапазон перестройки и минимальное ухудшение добротности резонатора $Q_p$. Петля с варикапом, показанная на рис.1, расположена на крышке внутри объема резонатора.

Наиболее простым способом описания воздействия петли с варикапом на резонатор является приближение связанных контуров за счет введения эквивалентных параметров резонатора и петли [1]. Анализ перестройки показывает, что сдвиг частоты резонатора [2] $\Delta f_p = k^2 f_p^3 / (f_p^2 - f_{var}^2)$, где $f_{var}$ – собственная частота петли с варикапом; $k = M_0 \sin\gamma / \sqrt{2L_p L_n}$ – коэффициент



3(530).indd 20 04.10.2016 14:49:56

связи узла варикапа и резонатора; γ – угол между касательной к плоскости петли и направлением магнитных силовых линий; $L_p$, $L_n$ – индуктивности резонатора и петли; $M_0$ – коэффициент их взаимоиндукции при γ = 90˚.

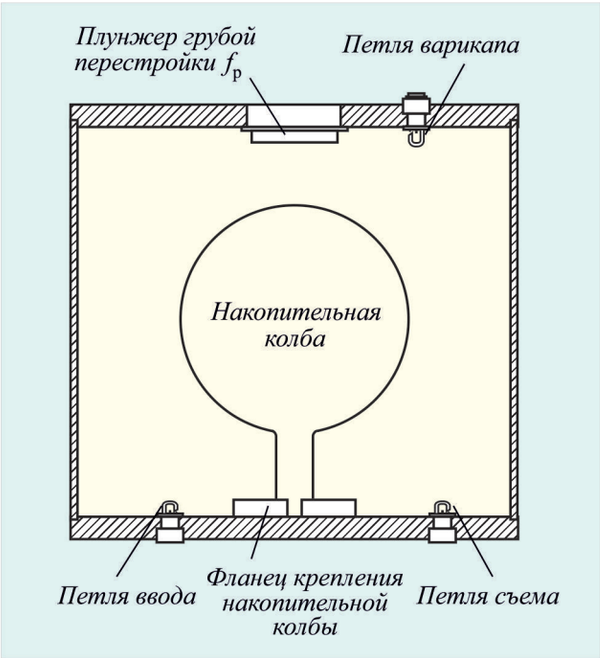



Рис.1. Цилиндрический резонатор с петлей варикапа

Добротность резонатора в таком случае будет составлять $Q_{р\text{-}var} = Q_р / (1 + R/R_р)$ с величиной вносимых потерь

$$R = (2\pi f_р M_0 \sin\gamma)^2 \Big/ R_{var}\left(1 + \left(Q_k \frac{f_р}{f_{var}}\left(1 - \frac{f_{var}^2}{f_р^2}\right)\right)^2\right),$$

где $Q_k = 2\pi f_{var} L_р / R_{var}$ – добротность петли с варикапом; $R_р$, $R_{var}$ – активные потери резонатора и петли с варикапом.

Но экспериментальное исследование [2] показывает, что теория связанных контуров, неплохо описывая перестройку частоты резонатора, во многих случаях некорректно объясняет поведение добротности. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости $Q_р$ с ростом обратного напряжения на варикапе для $\gamma = +90°$ и $\gamma = -90°$. Добротность измерялась по ширине резонансной кривой. Здесь же представлена также зависимость, вычисленная с помощью модели связанных контуров. Изменение напряжения смещения на варикапе от 0 до 15 В соответствует изменению емкости от 4,5 до 1,3 пФ. Тогда, согласно модели, $Q_р$ должна монотонно уменьшаться, а экспериментальные данные показывают, что характер поведения может быть иным.

На рис. 3 показаны экспериментальная и модельная зависимости $Q_р$ от угла поворота петли варикапа γ. Отличия графиков выражаются в том, что экспериментальная зависимость не симметрична, наибольшее ухудшение $Q_р$ наблюдается не при γ = +90° и γ = –90°, а там, где величина перестройки резонатора максимальна.



3(530).indd 21 04.10.2016 14:49:56

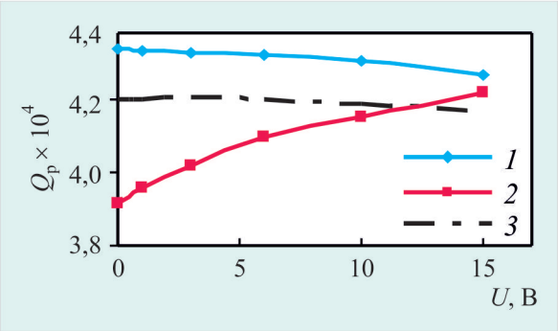



Рис. 2. Зависимость $Q_р$ от обратного напряжения на варикапе:
*1* – γ = -90°; *2* – γ = +90°; *3* – модель связанных контуров при γ = ±90°

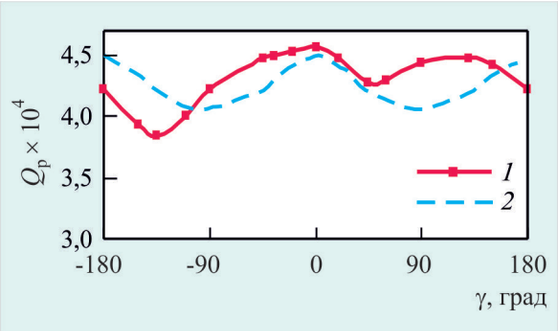



Рис. 3. Зависимость $Q_р$ от угла поворота петли варикапа γ при $U_{вар}$ = 3 В:
*1* – эксперимент; *2* – модель связанных контуров

## 2. МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ ОТ ПЕТЛИ-АНТЕННЫ

Несоответствие экспериментального и теоретического поведения добротности можно объяснить тем, что не учитывается распределённый характер рассматриваемых процессов. Как известно [3], поле в цилиндрическом резонаторе можно рассматривать как стоячую электромагнитную волну, которая получается при сложении двух навстречу движущихся волн с одинаковыми амплитудами. Волны падают по нормали к торцевым поверхностям (дну и крышке резонатора), отражаются и образуют стоячую волну. В таком случае петлю с варикапом можно рассматривать как рамочную приёмную антенну, находящуюся на отражающей поверхности резонатора. Антенна рассеивает часть электромагнитной волны. Варикап будет служить приемником (нагрузкой) такой антенны.

Во-первых, подтвердим, что с помощью теории рассеяния может быть объяснено изменение собственной частоты резонатора. В некоторых случаях данный метод уже применяется. Например, в работах [4, 5] показано, что расстройка открытого резонатора связана с ЭПР тела, помещенного у его открытого конца, следующим соотношением:

$$\Delta f_р = A\left[ (f_р\sqrt{\sigma_\Sigma}) / \sqrt{16\pi} \right],$$

где *A* – коэффициент пропорциональности, зависящий от характеристик резонатора. Согласно [6], любое тело, помещенное в резонатор, возмущает структуру полей выбранной моды, а



3(530).indd 22 04.10.2016 14:49:56

также изменяет ее частоту и добротность. Рассеяние от тела можно рассматривать как первый порядок теории возмущений.

В работе [7] было показано, что поле рассеяния любой нагруженной антенны можно считать результатом суперпозиции двух полей: поля рассеяния короткозамкнутой антенны и поля этой же антенны в режиме излучения с нагрузкой. Мощность, падающая на антенну, преобразуется в мощность, выделяющуюся в нагрузке антенны $P_{пр}$, в мощность потерь $P_{пот}$ и в мощность рассеянного поля $P_{рас}$.

Электромагнитное поле, рассеянное антенной, принято описывать эффективными поперечниками рассеяния. В сферической системе координат ($r$, φ, θ), центр которой совмещен с центром петли, интегральный ЭПР характеризует полную мощность, рассеянную во всем телесном угле:

$$\sigma_{\Sigma}(\theta,\varphi)=\frac{\oint\limits_{\Omega} P_r(\theta,\varphi;\theta',\varphi')d\Omega'}{\left|\vec{\Pi}\right|}=\frac{P_{рас}}{\left|\vec{\Pi}\right|},$$

где $P_r$ – мощность, рассеиваемая в направлении (θ', φ'). Величина $\sigma_{\Sigma}$ является функцией направления (θ, φ) прихода падающей волны.

Дифференциальный ЭПР определяется в дальней зоне антенны и характеризует мощность, рассеянную в единице телесного угла в направлении (θ', φ'):

$$\sigma_{д}(\theta,\varphi;\theta',\varphi')=\frac{4\pi P_r(\theta,\varphi;\theta',\varphi')}{\left|\vec{\Pi}\right|}.$$

Для того чтобы найти ЭПР короткозамкнутой петли, примем ряд упрощающих предположений (рис. 4, *а*). Рассмотрим петлю с варикапом в свободном пространстве. Предположим, что $a \ll \lambda$, где $a$ – радиус проволоки, из которой изготовлена петля; λ – длина волны используемых колебаний. В этом предположении ток, протекающий по петле, имеет составляющую только вдоль проволоки. Для дальнейшего упрощения геометрии перейдем к рассмотрению круглой петли, показанной на рис. 4, *б*. Введем цилиндрическую систему координат ($r$, φ, $z$), ось 0$z$ которой проходит через центр петли. Будем рассматривать нагрузку (варикап), находящуюся в точке ($x = a$, $\psi_0 = 0$, $z = 0$).

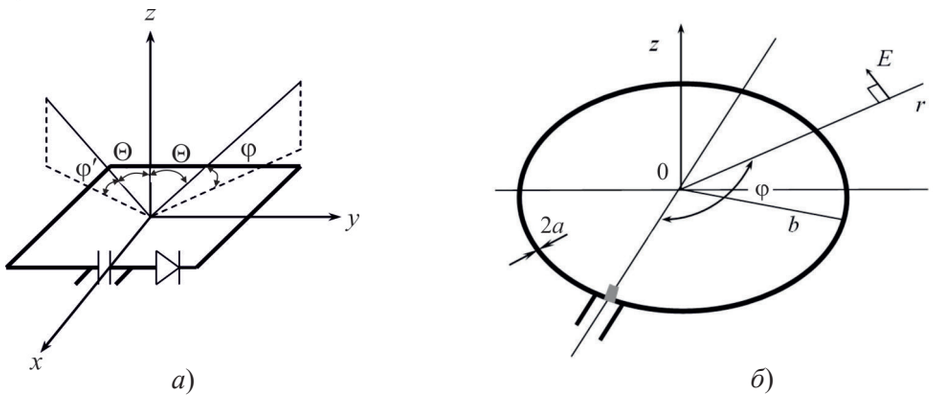



Рис. 4. Геометрия задачи:
*а* – реальная; *б* – упрощенная для вычисления тока в короткозамкнутой петле



3(530).indd 23 04.10.2016 14:49:57

Найдем распределение тока вдоль круглой петли. Согласно работе [8], на поверхности идеально проводящей петли должно быть выполнено следующее граничное условие:

$$E_{\varphi}^{\text{пад}} + E_{\varphi}^{\text{отр}} = Z_{\text{пр}} I(\varphi) \frac{\delta(\varphi - \psi_0)}{b}\bigg|_{z=0,\, r=b}, \tag{1}$$

где $I(\varphi)$ – ток в рамке; $Z_{\text{пр}}$ – импеданс нагрузки; $E_{\varphi}^{\text{пад}}$ – азимутальная составляющая падающей волны $\vec{E}^{\text{пад}}$; $E_{\varphi}^{\text{отр}}$ – тангенциальная составляющая отраженной волны $\vec{E}^{\text{отр}}$; $\delta(\varphi - \psi_0)$ – дельта-функция.

Решая уравнение (1), авторы работы [9] получили выражения для распределения тока в петле с нелинейной нагрузкой. Используя их решение, распределение тока в петле представим в виде рядов Фурье:

$$I_w(\varphi) = I_{0,w}^{\varepsilon} + 2\sum_{m=1}^{\infty} I_{m,w}^{\varepsilon} \cos(m\varphi) + 2i\sum_{m=1}^{\infty} I_{m,w}^{0} \sin(m\varphi). \tag{2}$$

Тогда для падающей волны с поляризацией, лежащей в плоскости петли (*TE*-поляризация, изображена на рис. 4, *б*), имеем:

$$I_{m,w}^{(\varepsilon)} = -\frac{2iE_0 b}{Z_0 \alpha_m^{\text{пад}}} \cdot \left\{ f_{\varepsilon m} + \frac{i}{Z_0 \pi} \frac{Z_{\text{а}} Z_{\text{пр}}}{Z_{\text{а}} + Z_{\text{пр}}} \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \frac{f_{\varepsilon p}}{\alpha_m^{\text{пад}}} \right\}, \tag{3}$$

$$f_{\varepsilon m} = J'_m(k_0 b \sin\theta) \exp\left\{ -i\left( k_0 h \cos\theta + m\frac{\pi}{2} \right) \right\},$$

для падающей волны с поляризацией в плоскости, перпендикулярной плоскости петли (*TM*-поляризация):

$$I_{m,w}^{(0)} = -\frac{2iE_0 b}{Z_0 \alpha_m^{\text{пад}}} f_{0m}, \tag{4}$$

где

$$f_{0m} = \frac{m\cos(\theta) J_m(k_0 b \sin\theta) \exp\left\{ -i\left( k_0 h \cos\theta + m\frac{\pi}{2} \right) \right\}}{k_0 b}.$$

В выражениях (3), (4) $E_0$ – амплитуда падающей волны; $h(0) = 1$, $h(m \neq 0) = 2$; $J_m(\zeta)$ и $J'_m(\zeta)$ – функции Бесселя и их производные соответственно; $\Omega_m$ – функция Вебера; $k_0 = 2\pi/\lambda$; $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$; $Z_{\text{а}}$ – входной адмитанс (полная проводимость) петли, учитывает дифракцию на тонкой проволоке и находится как бесконечная сумма:

$$\frac{1}{Z_{\text{а}}} = -\frac{i}{Z_0 \pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{h(m)}{\alpha_m^{\text{пад}}},$$

$$\alpha_0^{\text{пад}} = \frac{k_0 b K_1\left( (1/2)(k_0 b)^2 (K_2 - K_1) - K_1 \right)}{(1/2)(k_0 b)^2 (K_0 + K_2) - K_1}, \quad \alpha_m^{\text{пад}} = \frac{1}{2} k_0 b \left( K_{m+1} - K_{m-1} \right) - \frac{K_m}{b},$$



3(530).indd 24 04.10.2016 14:49:57

$$K_0 = \frac{1}{\pi}\ln\left(\frac{8b}{a}\right) - \frac{1}{2}\int_0^{2k_0b}\Omega_0(z)dz - \frac{j}{2}\int_0^{2k_0b}J_0(z)dz,\quad K_{n+1} - K_n = \Omega_{2n+1}(2k_0b) + jJ_{2n+1}(2k_0b).$$

В работах [8, 10] показано, что в случае небольших (по сравнению с λ) и тонких проволок ряды в формулах (2), (3), (5) быстро сходятся, поэтому для оценки достаточно учета первых 4 членов ряда.

Используя результаты работ [7…11], а также формулы (2)…(5), можно вычислить дифференциальный ЭПР короткозамкнутой петли:

$$\sigma_{\text{д}}(\varphi,\varphi') = 4\pi \lim_{r\to\infty} r^2 \frac{\left|E_\varphi(\varphi)\right|^2}{\left|E^{\text{пад}}(\varphi')\right|^2},$$

где $r$ – расстояние до точки наблюдения в дальней зоне петли; $E^{\text{пад}}$ – амплитудное значение напряженности падающего поля; $E_\varphi(\varphi)$ – амплитудное значение напряженности поля рассеяния падающей волны.

В рамках модели считаем, что вся мощность в цилиндрическом резонаторе переносится через поперечное сечение, но часть этой мощности, характеризуемая ЭПР петли, рассеивается. Интегральный ЭПР имеет размерность площади и равен нормальной к вектору Пойтинга площадке, которая рассеивает всю падающую на нее мощность. Нагруженную добротность резонатора можно представить следующим образом:

$$Q_{\text{р}} = 2\pi\frac{W_{\text{зап}}}{(P_L/f_{\text{п}})}, \tag{6}$$

где $P_L$ включает мощность резистивных потерь и потери через петли связи; $W_{\text{зап}}$ – энергия, запасенная в резонаторе. Учтем потери, вызванные петлей. В первом приближении можно считать, что привнесение рассеивающей петли не изменяет запасенную энергию резонатора. Энергия, запасенная в резонаторе, определяется, в свою очередь, вектором Пойтинга, поперечным сечением резонатора и частотой колебания. Тогда из формулы (6) можно получить выражение, связывающее добротность резонатора с потерями и ЭПР петли:

$$\frac{1}{Q_{\text{р}}^{\text{рас}}} = \frac{P_L + \sigma_\Sigma\left|\vec{\Pi}\right|}{2\pi f_{\text{п}}W_{\text{зап}}} = \frac{1}{Q_{\text{р}}} + \frac{\sigma_\Sigma\left|\vec{\Pi}\right|}{2\pi f_{\text{п}}(\left|\vec{\Pi}\right|\pi b^2/f_{\text{п}})} = \frac{1}{Q_{\text{р}}} + \frac{\sigma_\Sigma}{2\pi^2b^2},$$

где $\left|\vec{\Pi}\right|$ – модуль вектора Пойтинга; $\sigma_\Sigma\left|\vec{\Pi}\right|$ – потери рассеяния на петле.

В реальной ситуации мощность в сечении резонатора распределена неравномерно и определяется структурой моды колебания. Это можно учесть [12], введя коэффициент $F_{\text{м}}$ – отношение мощности невозмущенного поля моды $H_{011}$ в месте расположения петли к средней мощности поля. Тогда:

$$Q_{\text{р}}^{\text{рас}} = \frac{Q_{\text{р}}}{1+\sigma_\Sigma F_{\text{м}}/2\pi^2b^2}. \tag{7}$$

На рис. 5 представлены результаты вычислений $Q_{\text{р}}^{\text{рас}}$ по формуле (7) с учетом коэффициента $F_{\text{м}}$ и без него. На рисунке также представлены данные экспериментального исследования.



3(530).indd 25 04.10.2016 14:49:57

Петля располагалась на радиусе 8 см от центра при общем радиусе резонатора 14 см. Плоскость петли перпендикулярна к радиусу ($\gamma = \pm 90°$), данный случай соответствует максимальному ЭПР $\sigma_{max\Sigma}$. Учет места расположения петли в резонаторе приводит к меньшему расхождению теоретических и экспериментальных данных. Также очевидно, что для наименьшего ухудшения $Q_р$ необходимо выбирать периметр петли не более 0,3λ, лежащий не в резонансной области.

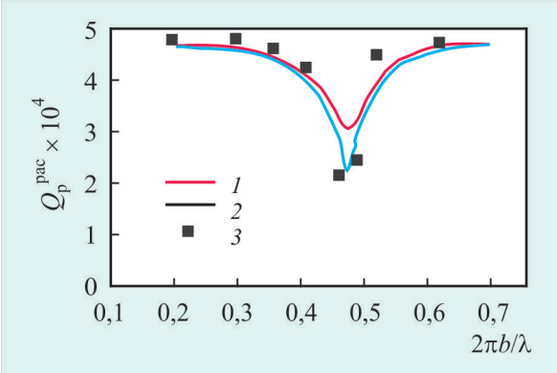



Рис. 5. Зависимость добротности резонатора от периметра закороченной петли:
*1* – расчет по среднему полю; *2* – расчет с учетом коэффициента $F_м$; *3* – экспериментальные данные

### 3. УЧЕТ КИРАЛЬНОСТИ ПЕТЛИ С ВАРИКАПОМ

Вернемся к случаю петли с варикапом. Ограничимся нерезонансным случаем $l < \lambda/2$. Расчеты показывают, что при повороте относительно оси $x$ в свободном пространстве (см. рис. 4, *а*) ЭПР петли меняется в соответствии с выражением $\sigma_\Sigma \approx \sigma_{max\Sigma} (\sin \lambda)^4$. В таком случае в резонаторе, в соответствии с распределением поля, в моде $H_{011}$ минимум добротности должен совпадать с $\gamma = \pm 90°$. Но на рис. 3 минимумы наблюдаются при $\gamma = -135°$ и $\gamma = +45°$. Очевидно также, что они несимметричны. Эксперимент показывает, что угол минимумов изменяется при вращении крышки резонатора, на которой установлена петля с варикапом, относительно дна резонатора, в котором располагаются петли связи.

В работе [13] было предпринято исследование вторичного поля полуволновых рассеивателей, созданных на основе рамочной и вибраторных антенн, с нагрузкой в виде диода. Было установлено, что при изменении оси рассеивателей на 180° фаза вторичного поля также изменяется на 180°.

В работе [14] для случая одиночной проволочной антенны с сосредоточенной нагрузкой, облучаемой плоской волной, приведены следующие соотношения:

$$\sigma_д = \sigma_0 |1-\alpha|^2 \left| \frac{Z_{пр} + \dfrac{Z_а}{1-\alpha}}{Z_{пр} + Z_а} \right|^2, \tag{8}$$

$$\alpha = \frac{I_0(\theta', \varphi') V_\infty(\theta, \varphi)}{\vec{p}_r \vec{E}_{пад}}, \tag{9}$$



3(530).indd 26 04.10.2016 14:49:57

где $\sigma_0$ – дифференциальный ЭПР короткозамкнутой антенны; $I_0(\theta', \varphi')$ – ток короткого замыкания, произведенный волной, пришедшей с направления $(\theta', \varphi')$ наблюдения; $V_\infty(\theta, \varphi)$ – напряжение на клеммах разомкнутой нагрузки, произведенное волной, пришедшей с направления $(\theta, \varphi)$ прихода падающей волны; $\vec{E}_{пад}$ – напряженность поля падающей волны; $\vec{p}_r$ – дипольный момент второй облучающей антенны, эквивалентный антенне, исследующей поле рассеяния; $\alpha$ – функция направлений передачи и приема, формы антенны, а также места расположения нагрузки.

Перепишем формулу (8) в более удобном для анализа виде:

$$\frac{\sigma_д}{\sigma_0} = |1-\alpha|^2 \left| \frac{Z_{пр} + \dfrac{Z_а}{1-\alpha}}{Z_{пр} + Z_а} \right|^2. \tag{10}$$

В нашем случае в формуле (9) $\vec{p}_r$ можно заменить на коллинеарную напряженность поля квазиплоской волны $\vec{E}^r_{пад}$. В этом случае формулу (9) можно переписать:

$$\alpha = \frac{I_0(\theta', \varphi')V_\infty(\theta, \varphi)}{\Theta \vec{E}^r_{пад} \vec{E}_{пад}}, \tag{11}$$

где $\Theta$ – коэффициент.

Проанализируем выражения (10), (11). Численные оценки показывают, что в рассматриваемом случае величина $\alpha$ может варьироваться в диапазоне $-0{,}25 \le \alpha \le 0{,}25$. В частности, при закороченной петле $\alpha$ равна нулю, и тогда, согласно формуле (9), ЭПР переходит в ЭПР ненагруженной (закороченной) петли. При реализуемых параметрах реактивная часть входного импеданса петли $\mathrm{Im}(Z_а)$ положительная, поэтому при положительной $\alpha$ максимум на шкале реактивной части импеданса нагрузки $\mathrm{Im}(Z_{пр})$ находится правее минимума.

На рис. 6 показано поведение $\sigma_\Sigma/\sigma_0$ в зависимости от реактивной части нагрузки при $\alpha = 0{,}2$ и $\alpha = -0{,}2$. Изменение знака связано с изменением угла $\gamma$ петли на 180°. При этом, как уже отмечалось, фаза рассеянного поля также изменяется на 180°. Вычисления произведены при следующих параметрах: $a/\lambda = 0{,}42$; $l_{пет} = 0{,}056$ м; $Z_а = 3{,}5+300j$. Кривая *1* на рис. 6 соответствует случаю $\gamma = -90°$ ($\alpha = 0{,}2$), кривая *2* – случаю $\gamma = +90°$ ($\alpha = -0{,}2$). В диапазоне $-30° \le \gamma \le 0°$ петля имеет минимальное ЭПР, при этом $\alpha \approx 0$ и $\sigma_\Sigma/\sigma_0 \approx 1$. Данный случай изображен кривой *3*.

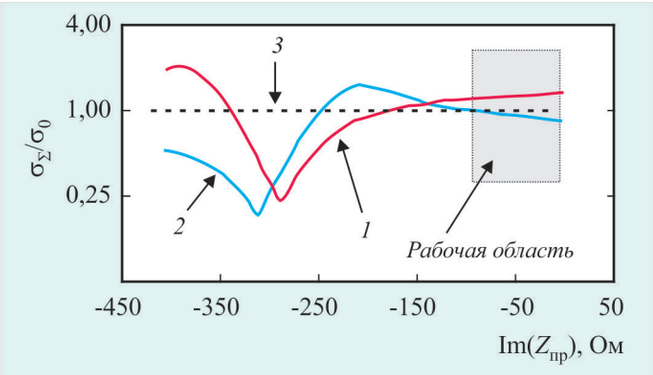



Рис. 6. Теоретическая зависимость $\sigma_д/\sigma_0$ при $\mathrm{Im}(Z_а) > 0$ от реактивной части нагрузки: *1* – $\alpha = 0{,}2$; *2* – $\alpha = -0{,}2$; *3* – $\alpha = 0$



3(530).indd 27 04.10.2016 14:49:57

Нагрузкой петли является варикап 3А618А-6. На частоте $1{,}42 \cdot 10^9$ Гц вычисленное реактивное сопротивление варикапа при изменении напряжения смещения от 0 до 20 В изменяется от -18,7 до -93,4 Ом. В пределах рабочей области, показанной на рис. 6, поведение отношения $\sigma_\Sigma / \sigma_0$, ответственного за поведение $Q_р$, с учетом знака совпадает с экспериментальными данными, приведенными на рис. 2.

Физическая интерпретация несимметричности представляется следующей. Структура суммарного поля существенно зависит от амплитудных и фазовых соотношений между первичным и вторичным полями. В одном случае отраженная от дна резонатора и рассеянная петлей варикапа волны оказываются синфазными, их поля складываются. В противном случае поля вычитаются. Минимального изменения $Q_р$ при изменении частоты резонатора можно добиться подбором места расположения петли и угла $\gamma$.

## 4. ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование цилиндрического резонатора, содержащего диэлектрическую колбу, плунжер, петли связи и петлю варикапа (см. рис.1), с помощью пакета CST Microwave Studio позволило выявить следующее. В диапазоне 1,4…1,44 ГГц кроме рабочей моды $H_{011}$ возбуждаются 3 вида колебаний. Визуализация структуры мод позволила идентифицировать их следующим образом. Две нижние малодобротные моды принадлежат виду колебаний квази-$H_{111}$. Распределения их полей подобны с точностью до поворота на 90°. Наличие петель связи и варикапа снимает их поляризационное вырождение. Расположение максимума поля задается расположением и поворотом петель. Средняя по частоте мода является рабочей модой $H_{011}$. Высшая по частоте мода рассматриваемого диапазона идентифицирована как $E_{112}$-вид колебаний.

Моделирование показало, что для повышения добротности и симметричности резонансной характеристики рабочей моды $H_{011}$ особенно важно частотное расположение пары мод квази-$H_{111}$. Можно утверждать, что данная пара «порождается» петлей с варикапом, во всяком случае в резонаторе без узла варикапа данная мода не наблюдается либо находится далеко по частоте и ее не удается идентифицировать. Максимум поверхностных токов данных мод локализован на поверхности петли варикапа (см. рис. 7). Добротность данных мод примерно на порядок меньше добротности рабочего вида колебаний.

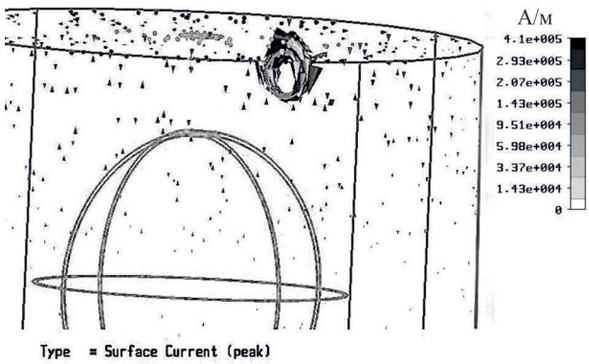



Рис. 7. Распределение поверхностного тока в моде квази-$H_{111}$

При определенном взаимном расположении элементов резонатора моды квази-$H_{111}$ могут быть близки по частоте к моде $H_{011}$. Особенно это проявляется при использовании сразу двух



3(530).indd 28 04.10.2016 14:49:57

петель с варикапами. Такое решение применяется в активных водородных стандартах частоты с автонастройкой резонатора методом переключения частоты [12]. В этом случае разность частот между модами при моделировании составляла от 1,3 до 18 МГц. Поскольку моды квази-$H_{111}$ очень чутки к изменениям ориентации и нагрузки петли варикапа, возникает нежелательный эффект сильной межмодовой связи [15].

Действия, направленные на фильтрацию данной пары мод, благоприятно сказываются на добротность и симметричность резонансной характеристики рабочей моды $H_{011}$. К данным действиям можно отнести, например, полный поперечный разрез резонатора вблизи торцевой поверхности, на которой расположена петля варикапа. Но наиболее эффективным средством является размещение на оси той торцевой поверхности, где расположен узел варикапа, цилиндрического проводящего элемента, создающего дополнительную частотную расстройку мод. Экспериментально подтверждено, что применение глубоко вкрученного плунжера (30 мм вместо 5 мм) создает дополнительную расстройку между модами около 15 МГц и в 2,5 раза уменьшает зависимость $Q_р$ от электронной перестройки частоты.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная электродинамическая модель позволила объяснить сложный характер изменения добротности резонатора при электронной перестройке частоты, зависящей от места расположения и угла поворота петли варикапа. В рамках модели энергия, накопленная в резонаторе, соотносится с энергией рассеяния от петли варикапа.

В качестве рекомендаций для наименьшего ухудшения $Q_р$ предложено выбирать периметр петли не более 0,3λ.

Показано, что большую роль в характере зависимостей играет киральность петли перестройки частоты, которая вызывается присутствием диода и его несимметричным расположением.

Показано, что результирующее распределение поля в объеме резонатора и расположение мод на частотной сетке существенно зависят от места локализации петли варикапа, а также от свойств и геометрических особенностей окружающих петлю элементов конструкции. Экспериментально доказано, что применение цилиндрического проводящего элемента с высотой, большей высоты петли на оси торцевой поверхности резонатора, в 2,5 раза уменьшает зависимость $Q_р$ от электронной перестройки частоты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Beverini, N.** Tuning of hydrogen maser cavity by means of a variable capacitance diode / N. Beverini, G. Vanier // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1979. – Vol. 28, No 2. – P. 100.

2. **Васильев, В. И.** Изменение добротности СВЧ-резонатора при электронной перестройке его частоты в водородном стандарте частоты и времени / В. И. Васильев // Радиоизмерения и электроника. – 2004. – Вып. 11. – С. 33.

3. **Никольский, В. В.** Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука. – 1989. – С. 294.

4. **Сидоренко, А. И.** Применение открытых резонаторов для измерения эффективной площади рассеяния тел / А. И. Сидоренко // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14, № 5. – С. 766 – 769.

5. **Киселев, В. К.** Физическое моделирование электромагнитного рассеивания в квазиоптических направляющих структурах терагерцового диапазона / В. К. Киселев // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2008. – Т. 13. – С. 359 – 376.



3(530).indd 29 04.10.2016 14:49:57

6. **Никольский, В. В.** Теория электромагнитного поля / В. В. Никольский. – М.: Высшая школа, 1964. – С. 340.

7. **Бененсон, Л. С.** Рассеяние электромагнитных волн антеннами / Л. С. Бененсон, Я. Н. Фельд // Радиотехника и электроника. – 1988. – Т. 33, № 2. – С. 225 – 246.

8. **Chang, D. C.** Characteristics of a horizontal circular loop antenna over a multilayered, dissipative half-space / D. C. Chang // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1973. – Vol. AP-21, No 6. – P. 871 – 874.

9. **Горбачев, А. А.** Нелинейное рассеяние электромагнитных волн на антеннах, расположенных вблизи границы раздела сред / А. А. Горбачев, Т. М. Заборонкова // Радиотехника. – 2001. – № 9. – С. 26 – 30.

10. **Row, R. V.** On the receiving properties of a small horizontal bare circular loop antenna buried in the ground / R. V. Row // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1969. – Vol. AP-17, No 5. – P. 563 – 567.

11. **Заборонкова, Т. М.** Рассеяние электромагнитных волн рамочной антенной с нелинейной нагрузкой / Т. М. Заборонкова // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2010. – № 1. – С. 70 – 76.

12. **Васильев, В. И.** Оптимизация системы автоматической настройки СВЧ-резонатора в активном водородном стандарте частоты / В. И. Васильев // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии. ИСТ-2014». – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – С. 22 – 23.

13. **Горбачев, А. А.** Влияние границы раздела двух сред на структуру электромагнитного поля, рассеянного нелинейной полуволновой рамкой / А. А. Горбачёв, Т. М. Заборонкова, С. П. Тараканов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1995. – Т. 38, № 9. – С. 964.

14. **Скиндлер, Дж.** Управление рассеянием электромагнитной энергии путем подключения комплексной нагрузки / Дж. Скиндлер, П. Блексмит // ТИИЭР. – 1965. – Т. 53, № 8. – С. 1137 – 1148.

15. **Васильев, В. И.** Резонатор магнетронного типа: исследование асимметричности модуля коэффициента передачи по мощности с помощью моделирования / В. И. Васильев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 2 (529). – С. 22 – 31.

*Статья поступила 31 мая 2016 г.*



3(530).indd 30 04.10.2016 14:49:57

УДК 621.385.6

# ЦИКЛОТРОННОЕ ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО. РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗОНАТОРА

**В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский**

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

**Предложена методика быстрого расчёта характеристического сопротивления объёмного резонатора ЦЗУ. Сопротивление определяется в ходе компьютерных 3*D*-расчётов конструкции и электрических параметров ЦЗУ. Особенностью метода является контроль точности расчёта по форме частотной характеристики устройства. Приведены примеры расчёта сопротивления конкретной модели.**

*КС: защита СВЧ-приёмных устройств, циклотронный резонанс, характеристическое сопротивление, компьютерное 3D электромагнитное моделирование*

# CYCLOTRON PROTECTIVE UNIT. CALCULATION OF RESONATOR CHARACTERISTIC IMPEDANCE

**V. G. Kalina, U. A. Budzinsky, S. V. Bykovsky**

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

**The method of rapid calculation of CPU resonant cavity characteristic impedance is proposed. The impedance is defined during computer-based 3*D* calculations of the design and CPU electric parameters. The distinctive feature of the method is the calculation accuracy control in CPU frequency characteristic form. The examples of calculating CPU specific model impedance are presented.**

*Keywords: microwave receiving unit protection, cyclotron resonance, characteristic impedance, computer-based 3D electromagnetic simulation*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Расчёту сопротивления объёмных резонаторов посвящены многие работы, например [1–4], где рассмотрены методы экспериментального определения сопротивления по критерию смещения частоты резонанса при введении диэлектрического тела в область резонатора с однородным электрическим полем либо аналитического расчёта сопротивления резонатора конкретной конструкции.

Ниже эта задача рассмотрена для резонатора циклотронного защитного устройства, в котором стенки резонатора, несущие противоположные заряды, электрически соединены двумя встречными ламелями [5]. Смежные торцы ламелей образуют плоский конденсатор с узким зазором величиной 0,05…0,3 мм, где электрическое поле взаимодействует с циклотронными колебаниями пучка электронов.

Экспериментальное определение характеристического сопротивления резонатора ЦЗУ на основе смещения частоты резонанса при введении диэлектрической плёнки в очень малый зазор трудоёмко и приводит к большим погрешностям измерений.



3(530).indd 31 04.10.2016 14:49:57

Аналитический расчёт сопротивления разнообразных конструкций резонаторов в процессе разработок связан со значительными потерями времени.

Простым и быстрым решением задачи является определение характеристического сопротивления резонатора в ходе компьютерных 3*D*-расчётов конструктивно-электрических параметров ЦЗУ.

В статье оценены четыре варианта расчёта характеристического сопротивления резонатора в ходе 3*D*-расчётов параметров ЦЗУ. Три варианта основаны на вариации ёмкости ламелей, четвёртый – на расчёте добротности резонатора.

Расчёт сопротивления резонатора проводится с учётом индуктивности проводника, соединяющего ламели с выходным трактом ЦЗУ. Потери в проводниках, как малозначащие, во внимание не приняты.

Во всех рассматриваемых вариантах зазор между торцами ламелей шунтирован сосредоточенным сопротивлением $R_ш$, при котором на частоте резонанса значение КСВН входной цепи $\sigma_0 = 1$: по результатам расчёта частотной характеристики КСВН входной цепи резонатора $\sigma(f)$ при нагрузке ламелей сопротивлением $R$ определяется значение КСВН при резонансе $\sigma_р$ (минимальное значение КСВН в пределах характеристики), после чего сопротивление $R$ заменяется на сопротивление $R_ш$ [6]:

$$R_ш = R / \sigma_р. \tag{1}$$

В ходе CAD-проектирования ЦЗУ расчёт характеристического сопротивления резонатора сопровождается построением частотной характеристики КСВН внешней цепи. Сравнение рассчитанной характеристики ЦЗУ с идеальной по Чебышеву позволяет оценить точность расчёта сопротивления и, в случае необходимости, уточнить результаты расчёта.

Приводимые ниже выкладки, в силу их очевидной простоты, изложены с минимальными пояснениями.

Примеры расчёта для наглядности даны для более простого случая построения секций ЦЗУ с характеристиками двухзвенного фильтра. Рассматривается пример конкретной модели резонатора, узла связи и внешней цепи (рис.1).

## 2. РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЁМКОСТИ ЛАМЕЛЕЙ

Параллельно сосредоточенному резистору $R_ш$, шунтирующему зазор между ламелями, вводится дискретная ёмкость $\Delta C$, по величине заведомо малая по отношению к ожидаемой ёмкости ламелей $C_{лам}$.

Ёмкость ламелей и соответственно характеристическое сопротивление резонатора определяются выражениями:

$$C_{лам} = \frac{\Delta C}{\left(\frac{f_0}{f_{01}}\right)^2 - 1}, \tag{2}$$

$$\rho_v = \frac{1}{2\pi f_0 C_{лам}} = \frac{1}{2\pi f_0 \Delta C}\left[\left(\frac{f_0}{f_{01}}\right)^2 - 1\right], \tag{3}$$



3(530).indd 32 04.10.2016 14:49:57

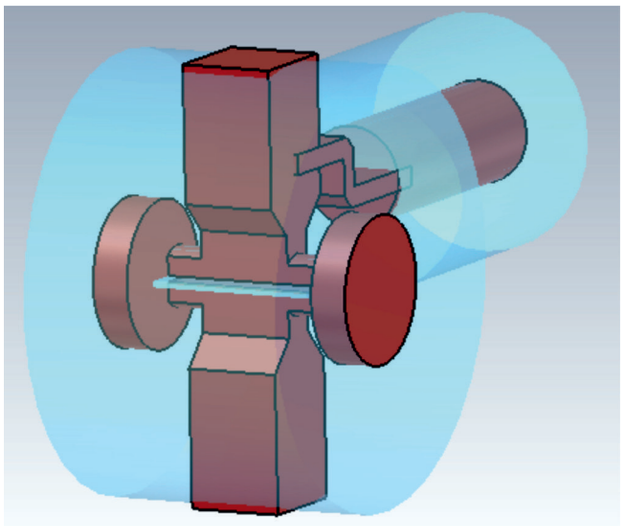


Рис. 1. Изображение модели объёмного резонатора ЦЗУ 3-см диапазона. Частота резонанса $f_0$ = 9,2115 ГГц, зазор между ламелями $d$ = 0,095 мм, длина и ширина ламелей: $l$ = 2,5 мм, $w$ = 0,6 мм. Ламели резонатора шунтированы сопротивлением $R_ш$. Волновое сопротивление коаксиальной линии – 50,8 Ом

где для исходной $f_0$ и результирующей $f_{01}$ частот резонанса справедливы соотношения:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{лам}}}, \quad f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(C_{лам} + \Delta C\right)}}. \tag{4}$$

*Пример расчёта*.

Параллельно сопротивлению $R_ш$ = 1207,5 Ом включена ёмкость $\Delta C = 1.1674 \cdot 10^{-14}$ Ф. Исходная частота резонанса $f_0$ = 9,2115 ГГц, как показывает компьютерный 3*D*-расчёт модели, изменилась до $f_{01}$ = 8,9882 ГГц.

Рассматриваемый резонатор, согласно расчёту, обладает характеристическим сопротивлением $\rho_v$ = 74,45 Ом:

$$\rho_v = \frac{1}{2\pi f_0 \Delta C}\left[\left(\frac{f_0}{f_{01}}\right)^2 - 1\right] = \frac{1}{2\pi \cdot 9,2115 \cdot 10^9 \cdot 1,1674 \cdot 10^{-14}}\left[\left(\frac{9,2115}{8,9882}\right)^2 - 1\right] = 74,45\ (\text{Ом}). \tag{5}$$

## 3. РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА, ЗАПОЛНЯЮЩЕГО ЗАЗОР ЛАМЕЛЕЙ

В зазор между ламелями введена пластина из диэлектрика с регулируемым значением диэлектрической проницаемости ε. Сосредоточенный резистор $R_ш$ расположен в вырезе пластины, узкой щели шириной 0,06 мм, либо в малом отверстии.

Вариация проницаемости диэлектрика на величину Δε = 0,079 относительно значения проницаемости ε = 1 при высоте зазора $d$ = 0,095 мм показала изменение частоты резонанса на $\Delta f$ = 198,9 МГц.



3(530).indd 33 04.10.2016 14:49:58

Характеристическое сопротивление резонатора может быть определено по формуле Хаби [1]:

$$\rho_v = 36\frac{\Delta f\,(\text{МГц})\,d\,(\text{мм})}{f_0^2\,(\text{ГГц})\,\Delta\varepsilon\,S\,(\text{мм}^2)} = 36\frac{198{,}9\cdot 0{,}095}{9{,}2115^2\cdot 0{,}079\cdot(2{,}5-0{,}06)\cdot 0{,}6} = 69{,}31\ (\text{Ом}). \qquad (6а)$$

Более точно сопротивление резонатора с пластиной диэлектрика может быть определено на основе работы [2], где выполнена коррекция формулы Хаби:

$$\rho_v = 18\frac{\Delta f d}{f_0\,\Delta\varepsilon S}\frac{2f_0 - \Delta f\cdot 10^{-3}}{(f_0 - \Delta f\cdot 10^{-3})^2} =$$
$$= 18\frac{198{,}9\cdot 0{,}095}{9{,}2115\cdot 0{,}079\cdot(2{,}5-0{,}06)\cdot 0{,}6}\ \frac{2\cdot 9{,}2115 - 198{,}9\cdot 10}{(9{,}2115 - 198{,}9\cdot 10)^2} = 71{,}62\ (\text{Ом}). \qquad (6б)$$

## 4. РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО СОБСТВЕННОЙ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА, ШУНТИРОВАННОГО СОПРОТИВЛЕНИЕМ $R_ш$

Вычисляется частотная характеристика КСВН $\sigma(f)$ с минимальным значением КСВН при резонансе $\sigma_р = \sigma_0 = 1$ для ламелей резонатора, шунтированных резистором $R_ш$.

По ветвям характеристики определяется ширина полосы частот $\Delta F$ при уровне отсчёта КСВН $\sigma_1$ [7]:

$$\sigma_1 = \frac{2+\sigma_р^2+\sqrt{4+\sigma_р^4}}{2\sigma_р} = \frac{2+\sigma_0^2+\sqrt{4+\sigma_0^4}}{2\sigma_0} = \frac{2+1+\sqrt{4+1}}{2} = 2{,}618. \qquad (7)$$

Измерение ширины полосы частот при критической связи ($\sigma_0 = 1$) с уровнем отсчёта $\sigma_1 = 2{,}618$ можно считать оптимальным. Повышенные значения КСВН ($\sigma_р > 1$) определяют возрастание уровня отсчёта $\sigma_1$ (см. рис. 2), при котором для связи, превышающей критическую, в широкой полосе частот нарастает отличие кривых резонанса объёмной структуры и контура на *RLC*-элементах [6]. При связи, меньшей критической, возрастает крутизна склонов частотной характеристики и соответственно увеличивается погрешность отсчёта ширины полосы $\Delta F$ по уровню $\sigma_1$.

Для рассматриваемой модели ЦЗУ уровень отсчёта $\sigma_1 = 2{,}618$ отвечает ширине полосы частот $\Delta F = 553{,}58$ МГц.

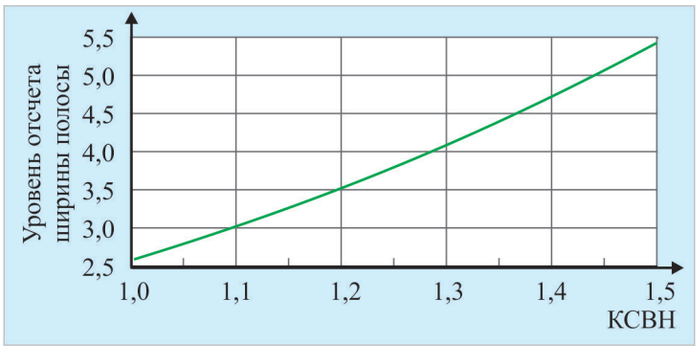



Рис. 2. График уровня отсчёта ширины полосы как функции от КСВН $\sigma_1$



3(530).indd 34 04.10.2016 14:49:58

Собственная добротность и характеристическое сопротивление резонатора рассматриваемой модели ЦЗУ определяются известными выражениями [7]:

$$Q_0 = \frac{f_0}{\Delta F} = \frac{9,2115 \cdot 10^9}{553,58 \cdot 10^6} = 16,64, \tag{8}$$

$$\rho_v = \frac{R_1}{Q_0} = \frac{1207,3}{16,64} = 72,54 \text{ (Ом)}. \tag{9}$$

## 5. ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ РАСЧЁТА СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗОНАТОРА

Характеристическое сопротивления резонатора $\rho_v$ и приведенное к ламелям сопротивление нагрузки $R_L$ являются основой построения частотной характеристики ЦЗУ как двухзвенного фильтра. Как правило, с целью увеличения ширины полосы частот такой фильтр строится по Чебышеву.

Эквивалентная схема ЦЗУ как двухзвенного фильтра приведена на рис. 3. Элементы последовательной цепи имитации циклотронных колебаний $R_c$, $L_c$, $C_c$, согласно работе [8], определяются выражениями (10) и (11). Их расчёт может быть введен в общую CAD-программу через макросы.

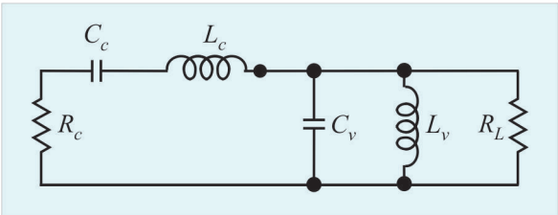



Рис. 3. Эквивалентная схема ЦЗУ как двухзвенного фильтра:
$R_L$ – сопротивление внешней цепи, пересчитанное на вход резонатора; $L_v$ и $C_v$ – индуктивность и ёмкость резонатора; $R_c$, $L_c$, $C_c$ – элементы цепи имитации циклотронных колебаний, включённой между торцами ламелей

При характеристическом сопротивлении резонатора $\rho_v$ = 69,31 Ом, нижевыбранном для рассмотрения как отличающееся от среднего значения $\rho_v$ четырёх вариантов расчёта, элементы $R_c$, $L_c$, $C_c$ по системе двухзвенного фильтра по Чебышеву имеют следующие значения [8]:

$$R_c = R_ш / \sigma_{max} = 1207,3 / 1,2396 = 973,9, \tag{10}$$

$$L_c = \frac{\alpha}{\delta} \frac{R_c^2}{2\pi f_0 \rho_v} = \frac{0,1102}{0,08888} \frac{973,9^2}{2\pi \cdot 9,2115 \cdot 10^9 \cdot 69,31} = 2,9316 \cdot 10^{-7}, \tag{11}$$

$$C_c = \frac{\delta}{\alpha} \frac{\rho_v}{2\pi f_0 R_c^2} = \frac{0,08888}{0,1102} \frac{74,45}{2\pi \cdot 9,2115 \cdot 10^9 \cdot 973,9^2} = 1,0938 \cdot 10^{-15}, \tag{12}$$



3(530).indd 35 04.10.2016 14:49:58

где $\sigma_{max}$ = 1,2396 – максимально допустимая в пределах полосы пропускания величина КСВН; коэффициенты α и δ отвечают принятому значению $\sigma_{max}$ = 1,2396 (см. таблицу П1.1 в работе [8]).

Частотная характеристика КСВН резонатора с *RLC*-элементами цепи имитации циклотронных колебаний (10)…(12) при $\rho_v$ = 69,31 Ом, $\sigma_{max}$ = 1,2397 приведена на рис. 4.

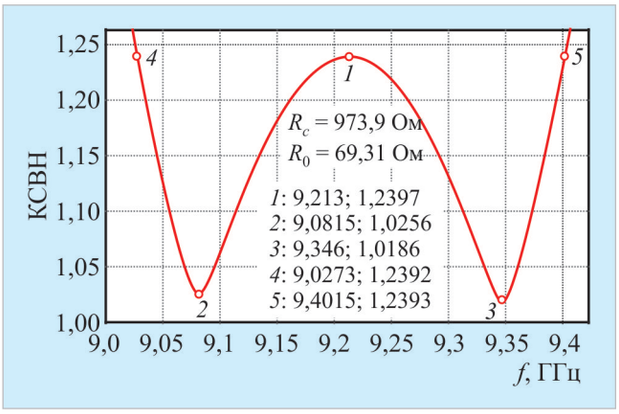



Рис. 4. Частотная характеристика КСВН
при расчётном значении сопротивления резонатора $\rho_v$ = 69,31 Ом

Характеристика КСВН при $\rho_v$ = 69,31 Ом отличается от идеальной характеристики двухзвенного фильтра по Чебышеву: минимальные значения КСВН не равны единице, пики характеристики сглажены.

Рассматриваемая система параллельного и последовательного резонаторов при $\rho_v$ = 69,31 Ом отвечает условиям построения фильтра по Чебышеву лишь приближённо: цепь имитации циклотронных колебаний построена с опорой на сопротивление $\rho_v$, величина которого неточно соответствует 3*D*-данным модели резонатора.

Отклонение величины сопротивления $\rho_v$ от номинального значения $\rho_{пот}$ при построении последовательного резонатора ведёт к возрастанию минимального значения потерь и нарушению формы характеристики с изменением ширины полосы частот по критерию $\sigma_{max}$. Ширина полосы при этом может возрастать либо уменьшаться относительно номинального значения при $\rho_v = \rho_{пот}$. При $\rho_v < \rho_{пот}$ ширина полосы частот возрастает относительно номинальной, при $\rho_v > \rho_{пот}$ ширина полосы уменьшается.

На частоте резонанса степень потерь сигнала по критерию КСВН $\sigma_{max}$ не зависит от погрешности расчёта характеристического сопротивления резонатора.

Направление коррекции величины $\rho_v$ – увеличение либо уменьшение сопротивления относительно принятого при расчёте $L_c$- и $C_c$-элементов – может быть при необходимости определено сравнением двух значений ширины полосы:

– $\Delta F_{изм}$, по результатам построения частотной характеристики;

– $\Delta F_{расч}$, по результатам расчёта по формуле

$$\Delta F = 2\pi f_0 \delta(\rho_v / R_c), \tag{13}$$

где $\rho_v$ – сопротивление, принятое при расчёте $L_c$- и $C_c$-элементов.

При $\Delta F_{изм} > \Delta F_{расч}$ действительное сопротивление объёмного резонатора выше, чем введенное в расчёт $L_c$- и $C_c$-элементов; при $\Delta F_{изм} < \Delta F_{расч}$ сопротивление объёмного резонатора меньше принятого в расчёте.



3(530).indd 36 04.10.2016 14:49:58

Сравнение измеренного и расчётного значений ширины полосы

$$\Delta F_{изм} = 374{,}2 \text{ МГц} > 366 \text{ МГц} = \Delta F_{рсч} \qquad (14)$$

позволяет заключить, что в рассматриваемом случае сопротивление объёмного резонатора превышает величину $\rho_v = 69{,}31$ Ом, которая принята при расчёте цепи имитации циклотронных колебаний.

Для рассматриваемой модели резонатора элементы цепи имитации $L_c$, $C_c$, как показывает ступенчатая коррекция величины $\rho_v$, более точно определяются значением $\rho_v = 72{,}8$ Ом.

При $\rho_v = 72{,}8$ Ом частотная характеристика КСВН внешней цепи резонатора (рис. 5) практически точно соответствует классической характеристике теории фильтров по Чебышеву.

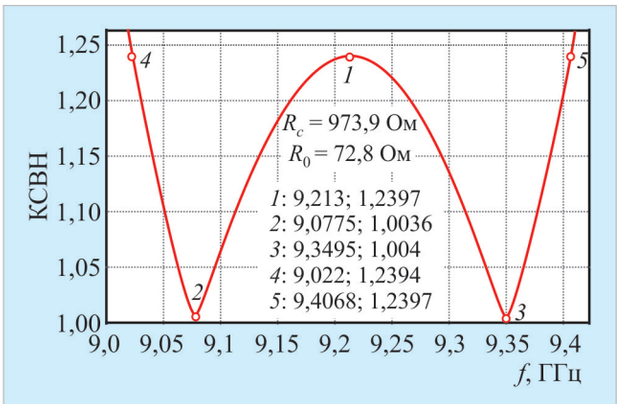



Рис. 5. Частотная характеристика КСВН при расчётном значения сопротивления резонатора $\rho_v = 72{,}8$ Ом

Ширина полосы частот по уровню $\sigma_{max} = 1{,}24$ при $\rho_v = 72{,}8$ Ом, определённая по графику рис. 5:

$$\Delta F = 9406{,}8 - 9022 = 384{,}8 \text{ (МГц)}, \qquad (15)$$

с точностью 0,07 % соответствует результату аналитического расчёта ширины полосы пропускания ЦЗУ при $\rho_v = 72{,}8$ Ом, $\sigma_{max} = 1{,}24$:

$$\Delta F = 2\pi f_0 \delta(\rho_v / R_c) = 2\pi \cdot 0{,}08888 \cdot 9{,}2115 \cdot 10^9 (72{,}8 / 973{,}9) = 384{,}53 \text{ (МГц)}.$$

Погрешность расчёта сопротивления резонатора и ширины полосы для рассмотренных методик расчёта относительно результатов расчёта модели и сопротивления резонатора $\rho_v = 72{,}8$ Ом приведена в таблице.

| Вид расчёта | Погрешность расчёта сопротивления резонатора, % | Погрешность расчёта ширины полосы, % |
|---|---|---|
| Дискретное изменение ёмкости ламелей | 2,27 | 1,16 |
| Вариация диэлектрической проницаемости заполнения ламелей, формула Хаби [1] | -5,28 | -2,7 |
| Вариация диэлектрической проницаемости заполнения ламелей, уточнённая формула Хаби [2] | -1,62 | -0,92 |
| Расчёт собственной добротности резонатора, нагруженного известным сопротивлением | -0,36 | -0,14 |



3(530).indd 37 04.10.2016 14:49:58

Классический метод расчёта характеристического сопротивления на основе измерения собственной добротности резонатора наиболее точен и достаточно прост.

Расчёт сопротивления резонатора на основе измерения собственной добротности, в отличие от других вариантов расчёта, характеризуется тем, что ламели резонатора нагружены однотипно как при определении $\rho_v$, так и при последующем построении частотной характеристики ЦЗУ, а распределение полей резонатора остаётся неизменным.

Расчёт характеристического сопротивления резонатора, в основе которого лежит определение собственной добротности резонатора, при 3*D*-проектировании ЦЗУ может быть рекомендован как достоверный и предпочтительный.

## 6. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЦЗУ

3*D*-проектирование ЦЗУ сопровождается контрольным расчётом электрического режима, например, с помощью макроса к общей программе.

Напряжение ускорения, без учёта контактной разницы потенциалов, и ток электронного пучка в пределах ширины ламелей могут быть определены на основе характеристического сопротивления, исходя из работы [8]:

$$V_0 = \left( k_1 \frac{\delta}{\alpha} \frac{\rho_v}{R_c} l \cdot 2\pi f_0 \right)^2 = \left( k_1 \frac{0,08888}{0,1102} \frac{72,8}{973,9} \cdot 0,0025 \cdot 2\pi \cdot 9,2115 \cdot 10^9 \right)^2 = 5,48 \text{ (В)}, \quad (16)$$

$$I_0 = 8\left( k_1 d \frac{\delta}{\alpha} \rho_v 2\pi f_e \right)^2 \frac{1}{R_c^3} = 8\left( k_1 0,095 \cdot 10^{-3} \frac{0,08888}{0,1102} \cdot 72,8 \cdot 2\pi \cdot 9,2115 \cdot 10^9 \right)^2 \frac{1}{973,9^3} = 65 \text{ (мкА)}, \quad (17)$$

где коэффициент $k_1 = 2,6835 \cdot 10^{-7}$ [9].

Конструкция рассматриваемой модели резонатора, как показывает расчёт тока и напряжения пучка, обеспечивает обычные для ЦЗУ нормы электрического режима.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристическое сопротивление резонатора ЦЗУ быстро и достаточно точно вычисляется в рамках 3*D*-проектирования электродинамической модели ЦЗУ – конструирования 3*D*-резонатора с последующим расчётом частотной характеристики и электрического режима. Расчёт сопротивления при этом опирается на готовую базу 3*D*-данных резонатора и цепи связи с источником сигнала, что обеспечивает простоту и краткость операций.

В работе приведены четыре примера расчёта сопротивления резонатора. Предпочтителен наиболее точный и простой вариант расчёта на основе определения собственной добротности резонатора.

Предложенная методика обеспечивает контроль достоверности расчёта сопротивления по результатам 3*D*-построения частотной характеристики ЦЗУ.



3(530).indd 38 04.10.2016 14:49:58

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хаби, В. С.** Измерение характеристического сопротивления резонатора с бессеточным зазором / В. С. Хаби // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1971. – Вып. 3. – С. 138 – 140.

2. **Прокофьев, Б. В.** К расчёту характеристического сопротивления резонаторов многолучевых вакуумных приборов СВЧ / Б. В. Прокофьев, А. В. Конов, В. Л. Савин // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 12.

3. **Мирошниченко, А. Ю.** Моделирование электродинамических параметров двухзазорного клистронного резонатора / А. Ю. Мирошниченко, В. А. Царев // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2013. – № 3.

4. **Мучкаев, В. Ю.** Расчет характеристического сопротивления резонаторов сложной формы с помощью трехмерной электродинамической модели / В. Ю. Мучкаев, В. А. Царев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (51). – Вып. 3. – С. 69 – 73.

5. **Будзинский, Ю. А.** Электростатические усилители / Ю. А. Будзинский, С. П. Кантюк // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 1 (455). – С. 21 – 27.

6. **Калина В. Г.** Циклотронное защитное устройство. Расчёт связи с нагрузкой / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 2 (529). – С. 8 – 12.

7. **Гинзтон, Э. Л.** Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинзтон; пер. с англ. под ред. Г. А. Ремеза. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – С. 509.

8. **Калина, В. Г.** Расчёт циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 19 – 38.

9. **Будзинский, Ю. А.** Расчёт циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып.1 (504). – С.70 – 87.

*Статья поступила 24 февраля 2016 г.*



3(530).indd 39 04.10.2016 14:49:58

УДК 621.385.64

# НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ МАГНЕТРОНА

**Л. В. Симоненко**

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

**А. Н. Симоненко**

*ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино*

**Области применения СВЧ-энергии в технологических процессах постоянно расширяются благодаря ряду полезных свойств, таких, как простота и безынерционность регулировки выходной мощности, быстрота и равномерность СВЧ-нагрева по всему объему, экологическая чистота энергии и получаемой продукции, высокая эффективность и т. д. Как правило, в качестве источников СВЧ-энергии в технологических установках используются магнетронные генераторы. В статье предложен один из методов оптимизации режима работы магнетрона. Рассмотрены некоторые аспекты технической реализации.**

*КС: магнетрон, волноводный направленный ответвитель, КСВН, оптимизация режима работы*

# DIRECTIONAL COUPLER AS A METHOD OF OPTIMIZING THE MAGNETRON MODE OF OPERATION

**L. V. Simonenko**

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

**A. N. Simonenko**

*CJSC «RPE «Magratep», Fryazino*

**The application fields of microwave energy in technological processes are constantly expanding thanks to a lot of useful properties such as the simplicity and inertia-free regulation of output power, high velocity and uniformity of microwave heating through the whole volume, ecological purity of energy and obtained production, high efficiency, etc. As a rule, magnetron oscillators are used as sources of microwave energy in technological installations. The article suggests one of the methods optimizing the magnetron mode of operation. Some aspects of technical realization have been considered.**

*Keywords: magnetron, waveguide directional coupler, VSWR, optimization of the mode of operation*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое применение в различных отраслях промышленности приобретают установки, работающие на магнетронах непрерывного действия. Как правило, эти приборы М-типа имеют мощность СВЧ-излучения до 100 кВт и более на частоте 915 МГц. Наиболее актуальным является вопрос по осуществлению контроля за работой установки, в которой используется мощный магнетронный генератор, с целью обеспечения выполнения технологического процесса и оптимизации режима работы магнетрона. Особый интерес пред-



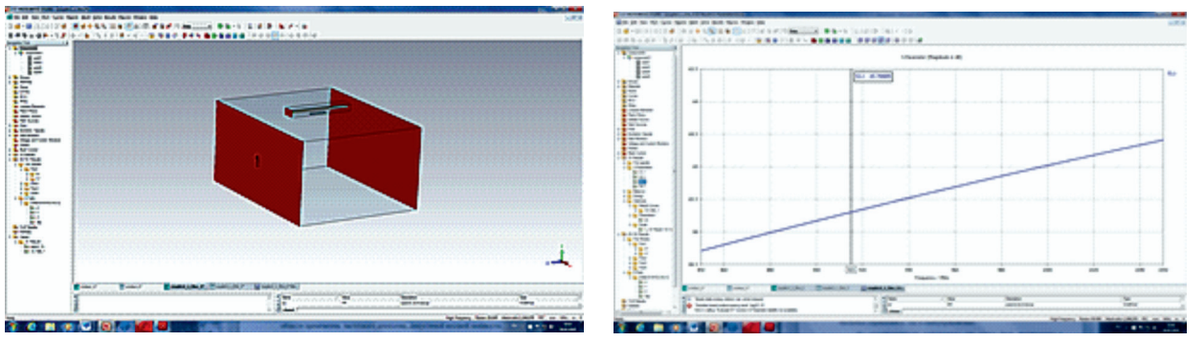
3(530).indd 40 04.10.2016 14:49:58

ставляет контроль мощности в волноводном тракте, а именно значений падающей и отраженной волн. Такой контроль можно осуществить при помощи волноводного направленного ответвителя.

## 2. РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОГО НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ

На сегодня разработка и конструирование волноводного направленного ответвителя значительно упростились с появлением специального прикладного программного обеспечения. Одним из пакетов таких программ является программа трехмерного моделирования электромагнитного поля CST Microwave Studio.

В прикладной программе CST Microwave Studio проводятся расчет и разработка волноводного направленного ответвителя (рис.1). По расчётным данным изготавливается направленный ответвитель, внешний вид которого представлен на рис. 2.



*а*) *б*)

Рис.1. Результаты расчетов в CST Microwave Studio и модель направленного ответвителя (*а*); зависимость параметра *S* от частоты (*б*)

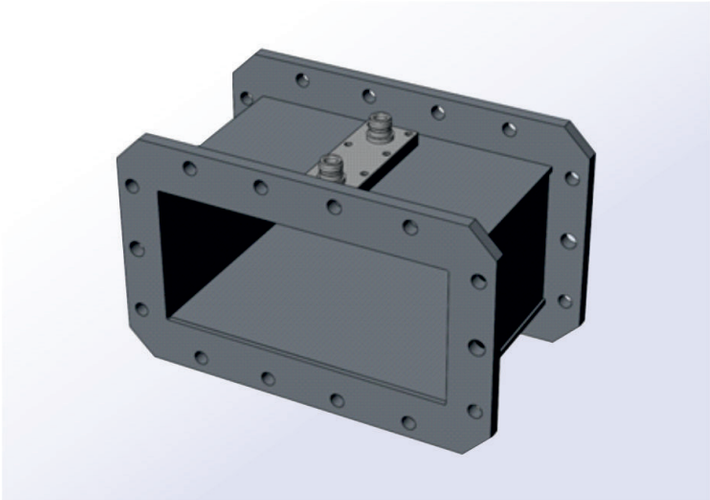


Рис. 2. Волноводная секция направленного ответвителя

## 3. МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ МАГНЕТРОНА

Предлагаемый метод оптимизации режима работы магнетрона заключается в предупреждении воздействия негативного фактора изменяющейся нагрузки на выходе магнетрона.



3(530).indd 41 04.10.2016 14:49:59

Направленный ответвитель используется для измерения отраженной волны в волноводном тракте, поступающей из области взаимодействия СВЧ-энергии, и устанавливается сразу за коаксиально-волноводным переходом магнетронного генератора. СВЧ-сигнал отраженной волны детектируется и подается на контроллер (рис. 3). В контроллере происходит вычисление коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) ρ по формуле [1]:

$$\rho = U_{пад} + U_{отр} / U_{пад} - U_{отр} \quad (1)$$

где $U_{пад}$ и $U_{отр}$ – соответственно напряжение сигнала падающей и отраженной волн.

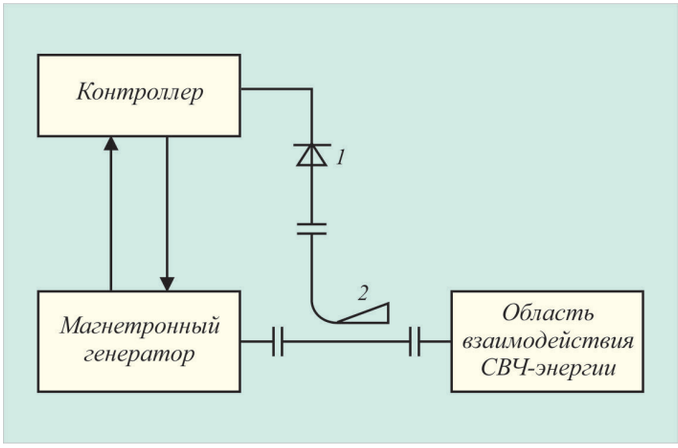



Рис. 3. Структурная схема СВЧ-установки с измерением сигнала отраженной волны: *1* – детекторная секция; *2* – волноводная секция направленного ответвителя

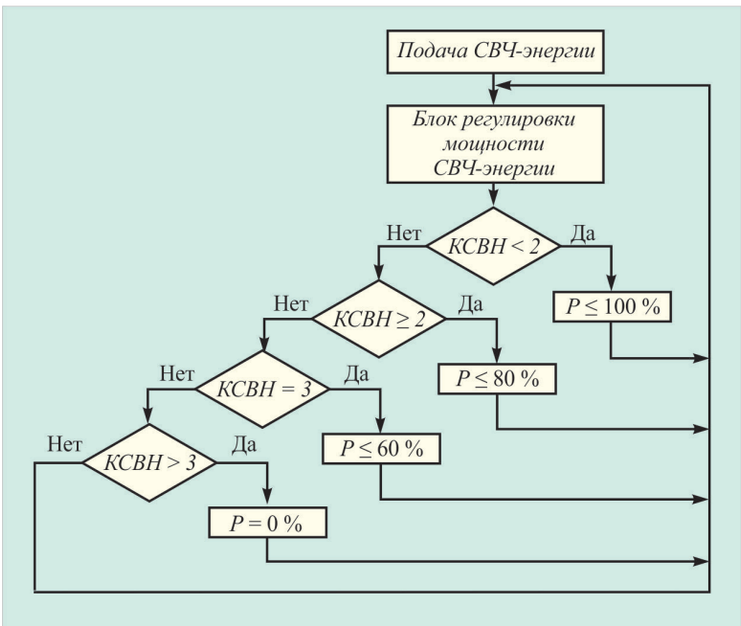



Рис. 4. Алгоритм системы оптимизации работы магнетрона

Далее результаты вычислений обрабатываются по алгоритму системы оптимизации работы магнетрона (рис. 4) и автоматика корректирует работу магнетрона до оптимального режима. Корректировка режима работы магнетрона происходит в следующем порядке. После подачи СВЧ-энергии в область взаимодействия система начинает отслеживать значение КСВН в режиме реального времени. Так, при значении КСВН, не превышающем 2,0, система дает разрешение на поднятие мощности до 100 %. Когда значение КСВН равно либо больше 2,0, система автоматически ограничивает увеличение мощности СВЧ до 80 %. Если значе-



3(530).indd 42 04.10.2016 14:49:59

значение КСВН равно 3,0, система не позволит повысить уровень выходной мощности магнетронного генератора более чем на 60 %, а при значении КСВН более 3,0 подача СВЧ-энергии в область взаимодействия полностью прекратится.

Такой метод оптимизации режима работы магнетрона позволит удовлетворить эксплуатационным требованиям ТУ на магнетроны непрерывного действия, выпускаемые в ЗАО «НПП «Магратеп». Применение метода оптимизации значительно улучшит такие немаловажные показатели, как надежность магнетрона и его долговечность.

## 4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ СБОР ПАРАМЕТРОВ НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ

Для полноценной работы метода оптимизации режима магнетрона при использовании одного волноводного направленного ответвителя необходимо провести подготовительные мероприятия, а именно осуществить сбор данных параметров направленного ответвителя. В первую очередь необходимо в СВЧ-установке (рис. 5) к волноводному тракту вместо рабочей камеры подключить хорошо согласованную нагрузку с КСВН не хуже 1,1. Далее в динамическом режиме нужно снять зависимость тока анода магнетрона $I_а$ от напряжения сигнала падающей волны $U_{пад}$ и результаты измерений внести в память контроллера.

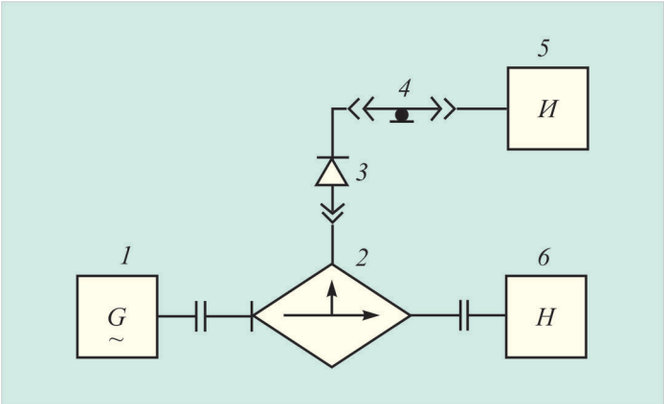



Рис. 5. Схема измерения сигнала падающей волны:
*1* – СВЧ-генератор; *2* – направленный ответвитель;
*3* – детекторная секция; *4* – соединительный кабель;
*5* – схема измерения $U_{пад}$; *6* – согласованная нагрузка

Таким образом, в рабочей СВЧ-установке контроллер при вычислении КСВН проводит измерение значения отраженной волны прямым способом, а измерение падающей волны осуществляется косвенно через значение анодного тока магнетрона $I_а$. Наглядно зависимости напряжения сигнала падающей волны $U_{пад}$ и тока анода $I_а$ от выходной мощности магнетрона $P_м$ приведены в таблице.

| Параметр | $P_м$, % | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| $U_{пад}$, В | $U_{пад1}$ | $U_{пад2}$ | $U_{пад3}$ | $U_{пад4}$ | $U_{пад5}$ | $U_{пад6}$ | $U_{пад7}$ | $U_{пад8}$ | $U_{пад9}$ | $U_{пад10}$ |
| $I_а$, А | $I_{а1}$ | $I_{а2}$ | $I_{а3}$ | $I_{а4}$ | $I_{а5}$ | $I_{а6}$ | $I_{а7}$ | $I_{а8}$ | $I_{а9}$ | $I_{а10}$ |



3(530).indd 43 04.10.2016 14:49:59

## 5. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

При реализации метода оптимизации режима магнетрона с использованием одного волноводного направленного ответвителя необходимо учитывать некоторые особенности работы системы. Так как измерение напряжения падающей волны $U_{пад}$ осуществляется косвенным методом и зависит от $I_а$, то выражение [1] примет вид:

$$\rho = U_{пад}(I_{ai}) + U_{отр} / U_{пад}(I_{ai}) - U_{отр}, \quad (2)$$

где $U_{пад}(I_{ai})$ – напряжение падающей волны, определяющееся через ток анода магнетрона $I_а$; $U_{отр}$ – напряжение отраженной волны.

Также присутствует особенность при определении напряжения отраженной волны $U_{отр}$, так как его искомое значение определяется путем вычисления через ток отраженной волны $I_{отр}$. Измерение тока отраженной волны $I_{отр}$ осуществляется по схеме, приведенной на рис. 6, где *VD1* – диод детекторной головки, сигнал с которого проходит через датчик тока *DA1* на нагрузочное сопротивление $R_1$. Сигнал с датчика тока *DA1* поступает на *АЦП* контроллера, после чего происходит вычисление величины напряжения отраженной волны $U_{отр}$ по формуле [3]

$$U_{отр} = I_{отр}R_1, \quad (3)$$

где $R_1$ – константа, которая определяется волновым сопротивлением линии.

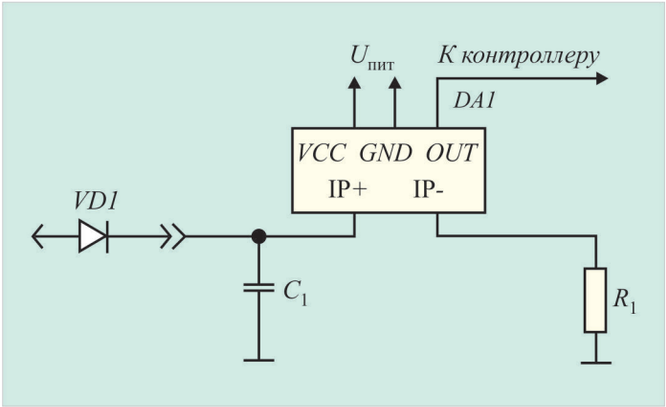



Рис. 6. Схема измерения тока отраженной волны $I_{отр}$

Принимая во внимание затухание в сигнальных кабелях от направленного ответвителя и датчиков тока, необходимо ввести поправочные коэффициенты для обеспечения достоверности измерений, тогда, учитывая выражение [3], получим

$$\rho = \frac{k_1 U_{пад}(I_{ai}) + k_2 I_{отр} R_1}{k_1 U_{пад}(I_{ai}) - k_2 I_{отр} R_1}, \quad (4)$$

где $k_1$ – коэффициент ослабления в сигнальном кабеле от датчика тока; $k_2$ – коэффициент ослабления в сигнальном кабеле от детекторной секции направленного ответвителя.

$$k_1 = 2Bl_1, \quad (5)$$

$$k_2 = 2Bl_2, \quad (6)$$



3(530).indd 44 04.10.2016 14:49:59

Здесь $B$ – удельное затухание кабеля, дБ/м; $l_1$ – длина кабеля от датчика тока анода; $l_2$ – длина кабеля от детекторной секции направленного ответвителя.

Для наглядности на рис. 7 приведена структурная схема взаимодействия отдельных блоков автоматики системы оптимизации.

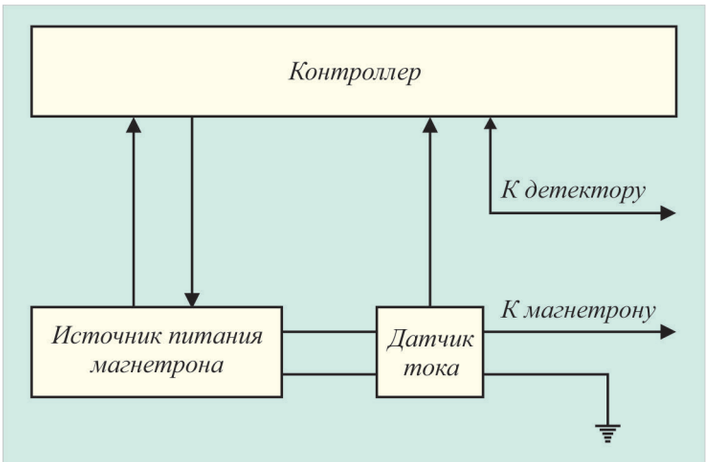



Рис.7. Структурная схема автоматики системы оптимизации

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод оптимизации режима работы магнетрона позволит значительно улучшить надежность и увеличить долговечность мощных магнетронов непрерывного действия при эксплуатации приборов у заказчика в составе технологических установок. Это в свою очередь даст хороший экономический эффект, так как снизит выход из строя магнетронов из-за ухудшения свойств нагрузки, позволит отказаться от использования дорогостоящего циркулятора и улучшить КПД установки в целом, что значительно снизит затраты электроэнергии. В настоящее время спрос на магнетроны большой мощности непрерывного действия постоянно возрастает, что дает мотивации для дальнейшего исследования методов оптимизации работы магнетрона с целью улучшения их надежности и долговечности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Лебедев, И. В.** Техника и приборы СВЧ. Т. 1 / И. В. Лебедев. – М.: Высшая школа, 1970. – 439 с.

2. **Морозов, О. А.** Современное состояние и тенденции развития магнетронов для СВЧ-нагрева в промышленности и медицине / О. А. Морозов, И. В. Соколов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 2 (476). – С. 3 – 9.

3. **Курушин, А. А.** Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio / А. А. Курушин, А. Н. Пластиков. – М.: Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.

4. **Бушминский, И. П.** Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства / И. П. Бушминский. – М.: Высшая школа, 1974. – 304 с.

*Статья поступила 30 марта 2016 г.*



3(530).indd 45 04.10.2016 14:49:59

# ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.391, 621.396

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГЕНЕРАТОР ХАОСА СВЧ-ДИАПАЗОНА НА БИПОЛЯРНОМ SiGe-ТРАНЗИСТОРЕ

**Н. А. Максимов, А. И. Панас**

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (Фрязинский филиал) Российской Академии наук, г. Фрязино*

**Предложен, реализован и экспериментально исследован генератор Колпитца, в котором в качестве активного элемента используется биполярный SiGe-транзистор и который позволяет получать сверхширокополосные хаотические колебания в микроволновом диапазоне. Экспериментально исследован модифицированный вариант генератора, имеющий максимально простую структуру и включающий один-единственный внешний реактивный элемент (индуктивность). При этом функции внешних емкостей в генераторе выполняют емкости *p–n*-переходов используемого транзистора. Получена устойчивая генерация хаотических колебаний в диапазоне 1…8,5 ГГц (по уровню 10 дБ) с рекордно высокими значениями КПД (до 7 %) для данного класса генераторов.**

*КС: генератор Колпитца, широкополосные и сверхширокополосные хаотические колебания, СВЧ-диапазон, энергетическая эффективность, биполярный SiGe-транзистор*

## SMALL-SIZE SUPERWIDEBAND MICROWAVE CHAOS OSCILLATOR ON BIPOLAR SiGe TRANSISTOR

**N. A. Maximov, A. I. Panas**

*FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS (Fryazino branch of the Institute)*

**Colpitz oscillator in which bipolar SiGe transistor is used as an active element and which allows to obtain superwideband chaotic oscillations in microwave range has been proposed, realized and investigated experimentally. A modified version of the oscillator having the simplest structure and including only one external reactive element (inductance) was investigated experimentally. At this, the functions of external capacities in oscillator are fulfilled by capacities of the transistor *p-n* junctions. Steady generation of chaotic oscillations was obtained within 1…8.5 GHz range (in 10 dB level) with extremely high efficiency values (up to 7 %) for the given class of oscillators.**

*Keywords: Colpitz oscillator, wideband and superwideband chaotic oscillations, microwave range, energetic efficiency, bipolar SiGe transistor*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции применения хаотических сигналов в различных радиоэлектронных системах подразумевают наличие эффективных источников сверхширокополосных СВЧ-сиг-



3(530).indd 46 04.10.2016 14:49:59

налов [1–3]. Использование в таких источниках в качестве активных элементов кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов приводит к обужению спектра генерируемых частот и смещению мощности сигнала в нижнюю часть СВЧ-диапазона. Это обстоятельство связано с ограничением максимальных рабочих частот кремниевых транзисторов, как правило, не превышающих единицы гигагерц. С точки зрения расширения полосы генерации источников более перспективным является использование в них транзисторов, изготовленных по SiGe-технологии. Основное достоинство этих транзисторов по сравнению с биполярными кремниевыми аналогами – это значительно более высокая максимальная рабочая частота, достигающая 200 ГГц при сохранении нелинейных свойств их *p–n*-переходов. Ещё одно преимущество SiGe-технологии заключается в более широких возможностях рассматриваемых генераторов (источников) хаоса в виде чип-устройств. В данной статье приводятся результаты исследования генератора сверхширокополосных хаотических колебаний и его модификации на основе *n–p–n* биполярного SiGe-транзистора BFP620F с граничной частотой 65 ГГц.

## 2. МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА

Одним из простейших по структуре транзисторных генераторов хаоса является генератор Колпитца, представляющий собой классическую схему емкостной трёхточки. В области низких частот странный аттрактор в такой системе впервые наблюдался в работе [4]. Один из вариантов схемы генератора приведен на рис.1.

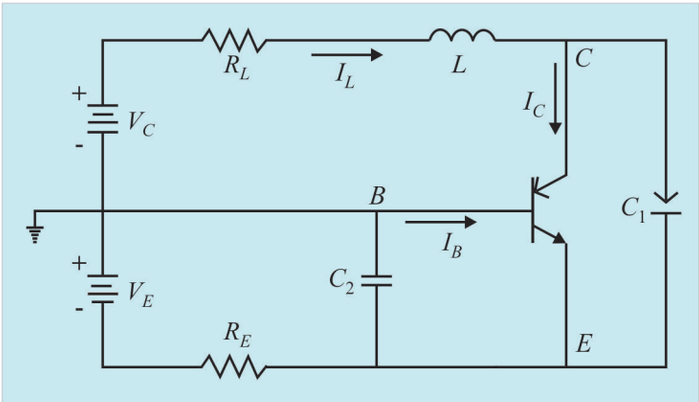



Рис. 1. Схема ёмкостной трёхточки
(генератор Колпитца) на биполярном транзисторе с общей базой

Представленная на рис.1 схема описывается системой трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} C_1\dot{V}_{CE} &= I_L - I_C, \\ C_2\dot{V}_{BE} &= \frac{1}{R_E}\left(V_E - V_{BE}\right) - I_L - I_B, \\ L\dot{I}_L &= V_C - V_{CE} + V_{BE} - I_L R_L. \end{aligned} \tag{1}$$

В качестве независимых переменных в (1) использовались напряжения на *p–n*-переходах транзистора: $V_{CE}$ – коллектор-эмиттер; $V_{BE}$ – база-эмиттер; $I_L$ – ток, протекающий через индук-



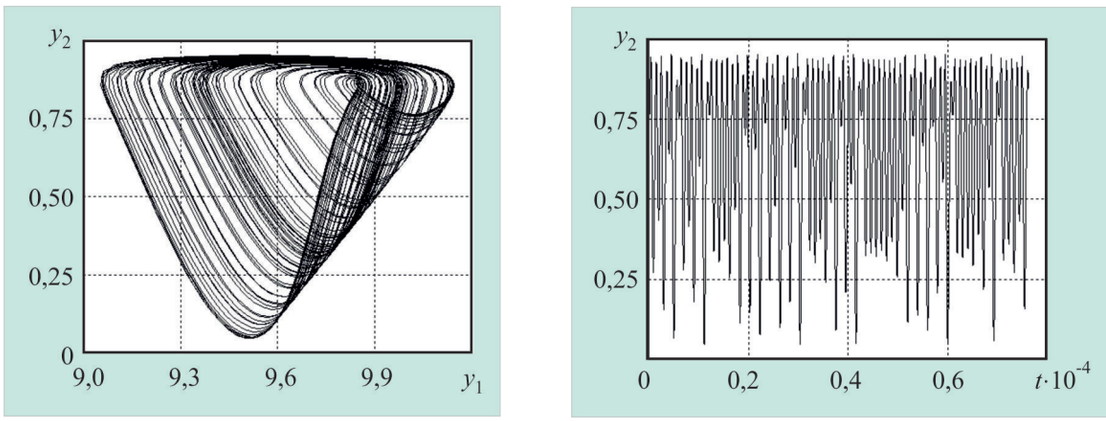
3(530).indd 47 04.10.2016 14:49:59

тивность; $V_C$, $V_E$ – напряжения питания коллектора и эмиттера соответственно. Передаточная характеристика транзистора в данном случае выбиралась в виде экспоненциальной функции:

$$I_C = I_0\left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T} - 1\right)\right),$$
$$I_B = I_C / \beta, \tag{2}$$

где β – коэффициент усиления по току; $I_0$ – обратный ток эмиттерного перехода; $V_T$ = 25,5 мВ – термический потенциал.

Численный анализ (1) и (2) показывает, что при определенных значениях параметров схемы её динамика становится хаотической. Пример колебательных характеристик одного из типовых режимов приведён на рис. 2.




*а*) *б*)

Рис. 2. Пример хаотического режима модели генератора:
*а* – проекция фазового портрета системы на плоскость $y_1$, $y_2$,
где $y_1$ – безразмерное значение переменной $V_{CE}$, а $y_2$ – безразмерная переменная $V_{BE}$;
*б* – временная реализация хаотического сигнала $y_2$

Для системы (1) характерен переход к хаосу через каскад бифуркаций удвоения периода и через разрушение петли сепаратрисы седла-фокуса [5].

Моделирование динамических режимов проводилось в безразмерных переменных, что давало основание предположить, что схема останется работоспособной в различных диапазонах частот, включая и СВЧ-диапазон.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ADS

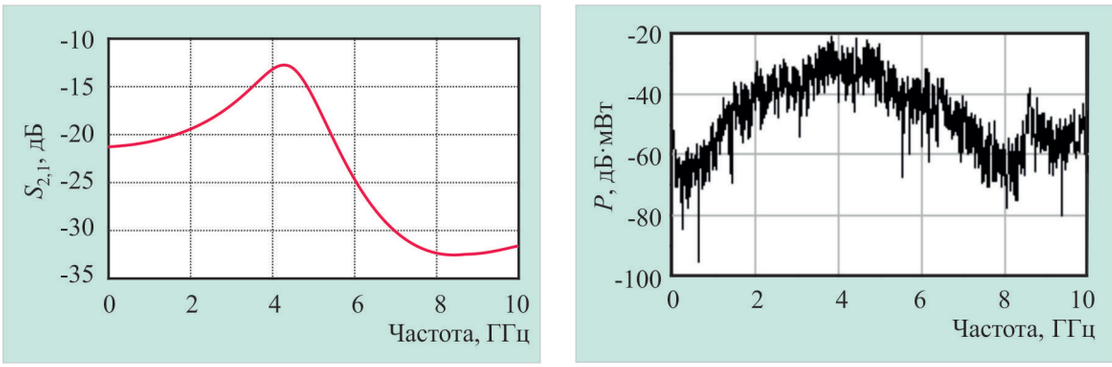
Для дальнейших исследований данной схемы использовался программный пакет Advanced Design System (ADS), позволяющий моделировать работу электронных устройств со сложной динамикой, в том числе и хаотической, в СВЧ-диапазоне. В качестве активного элемента использовался *n–p–n* биполярный SiGe-транзистор BFP620F с граничной частотой 65 ГГц. Параметры пассивных элементов схемы (рис. 1) имели следующие значения: $C_1 = C_2$ = 1 пФ, $L$ = 1нГ, $R_L$ = 33 Ом, $R_E$ = 390 Ом.



3(530).indd 48 04.10.2016 14:50:00

Частотно-избирательная цепь генератора формируется реактивными элементами $C_1$, $C_2$ и $L$, образуя $RLC$-фильтр нижних частот, активизированный биполярным транзистором [6]. В этом случае распределение мощности по диапазону частот и верхняя граница спектральной характеристики колебаний, возникающих в такой системе, определяются амплитудно-частотной характеристикой этого фильтра [6–9].

Номиналы элементов схемы подбирались таким образом, чтобы максимум АЧХ находился в окрестности $f = 4$ ГГц – центральной частоты диапазона 3…5 ГГц, тем самым создавая более предпочтительные условия для генерации в этой области. Как и при моделировании генератора, при определённом подборе параметров схемы в ней возникают хаотические колебания. Один из спектров таких колебаний приводится на рис. 3.




*а*) *б*)

Рис. 3. АЧХ частотно-избирательной цепи генератора (*а*) и спектр мощности (*б*) его сигнала в точке *C* схемы (см. рис.1)

Из спектральной характеристики следует, что основная часть мощности сигнала сосредоточена в окрестности $f = 4$ ГГц и по уровню приблизительно 15 дБ перекрывает полосу от 2 до 6 ГГц. Оценка энергетических характеристик генератора показывает, что при затраченной мощности около 100 мВт мощность сигнала в точке *C* (рис.1) составляет приблизительно 2 мВт, что соответствует КПД около 2 %.

## 4. ЭКСПЕРИМЕНТ

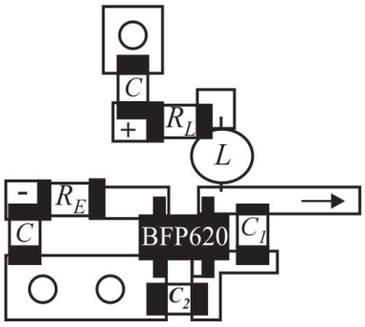



Рис. 4. Эскиз топологии генератора с навесными элементами ($R_L$ = 33 Ом, $R_E$ = 390 Ом, $L$ = 1 нГ, $C_1$ = 1 пФ, $C_2$ = 1 пФ)

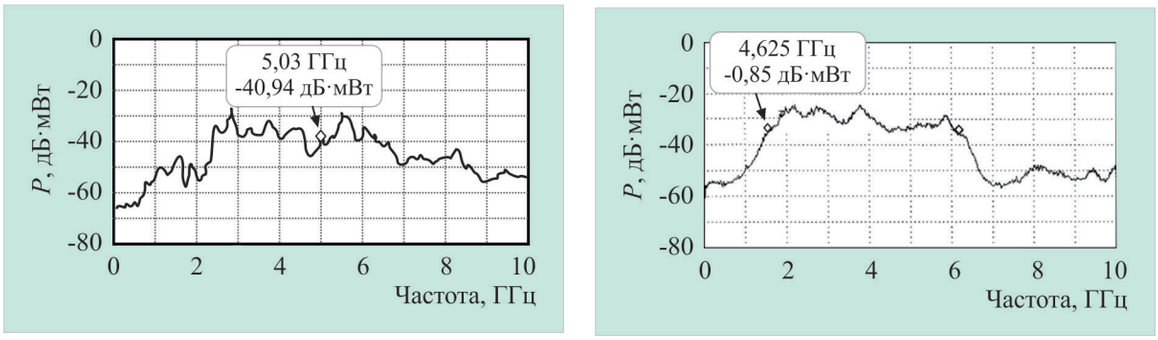
Экспериментальные исследования генератора проводились на макете, топология которого была рассчитана с помощью ADS. В качестве активного элемента использовался, как и при моделировании, кремний-германиевый *n–p–n* биполярный транзистор BFP620F. Схема генератора была собрана с использованием чип-элементов, соединяемых пайкой на контактных площадках, которые изготовлены на материале FR-4. Эскиз топологии генератора изображен на рис. 4.

На рис. 4 указаны такие же номиналы эле-



3(530).indd 49 04.10.2016 14:50:00

ментов, как и при моделировании, но в ходе экспериментов они менялись для апробации различных вариантов генератора. Питание осуществлялось от двух источников напряжения. Экспериментальное исследование режимов генератора показало, что в системе при низких напряжениях коллектор-база ($U_{к.б} \approx 0…2$ В) и высоких эмиттер-база ($U_{э.б} \approx 6$ В) довольно легко возникают многочастотные колебания, однако переход к хаосу затруднителен, а возникающие хаотические колебания неустойчивы и существуют в узких зонах изменения питающих напряжений транзистора. Спектральная характеристика одного из таких режимов приведена на рис. 5, *а*. Спектр занимает широкую полосу частот, но весьма неравномерен по диапазону. Второй режим работы генератора наблюдался при высоком напряжении коллектор-база ($U_{к.б} \approx 12$ В) и небольших эмиттер-база ($U_{э.б} \approx 0{,}75…1{,}5$ В). В этом случае хаотические колебания в системе возникали практически сразу при открывании перехода эмиттер-база и были устойчивы при изменении напряжения на переходе в указанных пределах. Спектральная характеристика типового режима генератора для этого случая приведена на рис. 5, *б*. При этом ширина спектра колебаний по уровню 15 дБ составляла 5 ГГц (1,5…6,5 ГГц).




*а*) *б*)

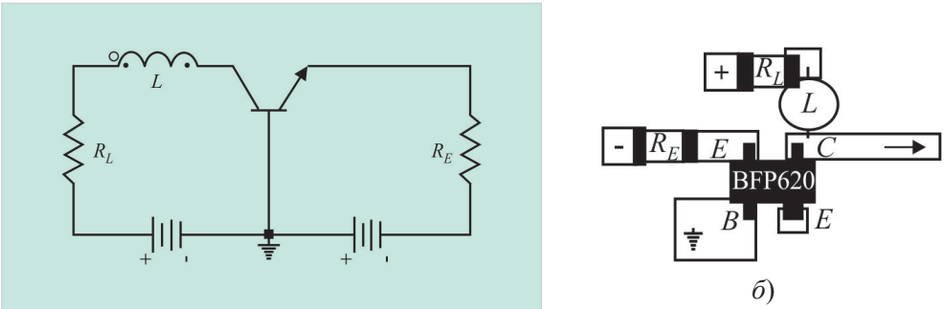
Рис. 5. Спектры мощности хаотических колебаний генератора в точке *C* (см. рис.1):
*а* – $U_к = 1$ В, $U_э = 6$ В; *б* – $U_к = 12$ В, $U_э = 1{,}5$ В

Напряжения питания транзистора для первого режима (рис. 5, *а*) были близки к зафиксированным напряжениям при моделировании: малое – на коллекторе ($U_к \approx 0{,}2…2$ В) и большое – на эмиттере ($U_э \approx 5…7$ В). Мощность сигнала на выходе генератора (коллекторная цепь) в таком режиме достигала 1 мВт, что соответствовало КПД генератора 1 %. При втором режиме работы транзистора выходная мощность (на нагрузку 50 Ом) достигала 4,5 мВт при КПД генератора около 2 %.

В диапазоне сверхвысоких частот, когда значения индуктивностей и емкостей измеряются единицами наногенри и пикофарад, начинают оказывать влияние емкости *p–n*-переходов и паразитные индуктивности СВЧ-транзисторов. Влияние межэлектродных емкостей приводит к тому, что генерация колебаний в схеме может происходить и при отсутствии емкостей $C_1$, $C_2$ (см. рис.1). Обратная связь в этом случае может осуществляться за счет внутренних емкостей *p–n*-переходов транзистора. Для кремний-германиевого транзистора BFP620F емкость коллектор-эмиттер составляет $C_{к.э} \approx 0{,}2$ пФ, а ёмкости других переходов соответственно $C_{к.б} = 0{,}12$ пФ, $C_{э.б} = 0{,}45$ пФ. При отсутствии внешних емкостей в схеме генератора использовался только один внешний реактивный элемент – индуктивность, которая в совокупности с емкостями *p–n*-переходов транзистора формировала частотно-избирательную цепь генератора (рис. 6).



3(530).indd 50 04.10.2016 14:50:00




а)

Рис. 6. Модифицированный генератор хаоса с упрощенной структурой:
*а* – радиотехническая схема; *б* – эскиз топологии с чип-элементами
($R_L$ = 33 Ом, $R_E$ = 390 Ом, $L$ = 1 нГ)

В соответствии с рис. 6 был создан лабораторный макет генератора, и проведено экспериментальное исследование его режимов при различных значениях внешней индуктивности $L$. Типичная картина развития колебаний в системе приведена на рис. 7. Напряжение питания эмиттер-база $U_{э.б}$ было фиксированным и составляло 0,75 В, а роль управляющего параметра выполняло напряжение коллектор-база $U_{к.б}$, изменяемое в пределах 0…12 В. Вплоть до $U_{к.б}$= 9 В в системе существовало колебание на частоте около 5,6 ГГц. Дальнейшее увеличение напряжения приводило к последовательному развитию субгармонических колебаний удвоенного периода, и при достижении значений 11…12 В развивались устойчивые хаотические колебания.

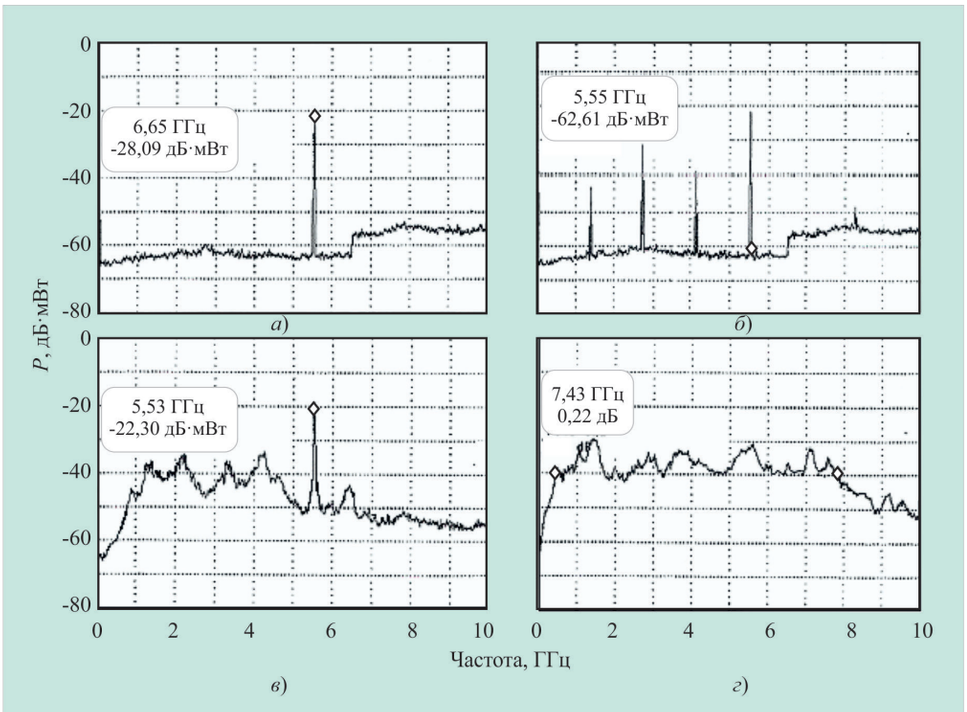



Рис. 7. Спектры мощности сигнала на выходе генератора
при фиксированном $U_{э.б}$= 0,75 В и изменении $U_{к.б}$ в пределах 0…12 В



3(530).indd 51 04.10.2016 14:50:00

При $L$ = 1 нГн на выходе генератора, нагруженного на 50 Ом, наблюдались хаотические колебания в полосе частот 0,5…8 ГГц, при этом мощность сигнала составляла 2,5 мВт при потребляемом токе 3 мА и суммарном напряжении питания 11,5 В, что соответствовало КПД устройства около 7 %.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В СВЧ-диапазоне с помощью пакета ADS был промоделирован и исследован во временной и частотной областях генератор хаоса, в основе которого лежит схема Колпитца. Изготовлен макет такого генератора и экспериментально исследованы его динамические режимы. Как при моделировании, так и в физическом эксперименте установлено, что в генераторе возможно существование сверхширокополосных хаотических режимов в диапазоне частот с центральной частотой 4 ГГц и полосой $\Delta f$ = 5 ГГц. Предложен вариант генератора, в котором отсутствуют внешние емкости, а используется только один реактивный индуктивный элемент. Экспериментально продемонстрированы устойчивые хаотические колебания в полосе частот $\Delta f$ = 7,5 ГГц с КПД около 7 %. Результаты работы могут быть использованы при разработке сверхширокополосных СВЧ чип-генераторов хаотических колебаний на основе SiGe-технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Дмитриев, А. С.** Мультимедийные сенсорные сети на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, М. Ю. Герасимов // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 4. – С. 1 – 9.

2. **Дмитриев, А. С.** Прямохаотические беспроводные системы связи / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, А. И. Панас; под ред. А. А. Борисова // Фрязинская школа электроники: колл. монография. – М.: Янус-К, 2012. – С. 455 – 475.

3. **Максимов, Н. А.** Твердотельные энергоэффективные генераторы хаотических колебаний СВЧ-диапазона и их применение в системах РЭП / Н. А. Максимов, А. И. Панас // Электронная техника, Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 2 (521). – С. 5 – 13.

4. **Kennedy, M. P.** Chaos in the Colpitts oscillator / M. P. Kennedy // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Theory and Applications. – 1994. – Vol. 41, No 11. – P. 771 – 774.

5. **Feo, O.** The Colpitts oscillator. Families of periodic solutions and their bifurcftions / O. Feo, G. Maggio, M. Kennedy // Int. Journal of Bifurcations and Chaos. – 2000. – Vol. 10, No 5. – P. 935 – 958.

6. **Maksimov, N. A.** Three-point circuit for generating band-limited chaotic oscillators / N. A. Maksimov, A. I. Panas // Proc. Int. Symp. Signals Circuits Systems (SCS'2001), Iasi, Romania, July 10-11, 2001. – P. 65 – 68.

7. **Максимов, Н. А.** Сверхширокополосный генератор хаоса СВЧ-диапазона на сосредоточенных элементах / Н. А. Максимов // Труды Всероссийской конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и акустике» (СРСА–2006), 2006, 4–7 июля, Муром, Россия. – С. 154 – 157.

8. **Дмитриев, А. С.** Генерация хаоса, монография / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, Н. А. Максимов, А. И. Панас. – М.: Техносфера, 2012. – 423 с.

9. **Максимов, Н. А.** СВЧ-генератор хаоса на биполярном SiGe гетеротранзисторе / Н. А. Максимов, А. И. Панас // Труды 2-й Российско-белорусской науч.-техн. конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение», 2015, Нижний Новгород, Россия.

*Статья поступила 13 апреля 2016 г.*



3(530).indd 52 04.10.2016 14:50:00

УДК 621.3.049.771.14

# ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ МОЩНОЙ ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА

**В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина, Д. С. Гринберг, Н. В. Абакумова**

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

**Приведены результаты исследования взаимодействия тепловых полей четырёх кристаллов ПТШ фрагмента ГИС СВЧ-диапазона с параллельным сложением мощности. Показано, что увеличение коэффициента теплопроводности хорошо электро- и теплопроводящей пластины (дополнительного теплоотвода) приводит к общему снижению уровня температур пластины за счёт увеличения эффекта интегрального теплоотвода и охлаждению транзисторов, контактирующих с пластиной. Кроме того, с ростом коэффициента теплопроводности наблюдается смещение максимума температур с верхнего кристалла транзистора на нижний.**

*КС: кристалл ПТШ, золотой балочный вывод, ГИС СВЧ-диапазона, тепловые поля, максимальная температура нагрева*

# THE THERMAL ANALYSIS OF POWER MICROWAVE HIC OPERATION

**V. A. Iovdalsky, N. V. Ganyushkina, D. S. Grinberg, N. V. Abakumova**

*JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Fryazino*

**The results of investigating the interaction of thermal fields of four Schottky FET crystals of microwave HIC fragment with parallel power addition are presented. It is shown that the increase of the heat conductivity factor of electro- and thermal plate (of additional heat sink) is leading to total decrease of the plate temperature level due to integrated heat sink effect increase and cooling of transistors contacting with the plate. Besides, with the increase of the heat conductivity factor the offset of temperature maximum from the upper transistor crystal to the lower one is observed.**

*Keywords: Schottky FET crystal, gold beam lead, microwave HIC, thermal fields, maximal thermal temperature*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ужесточение требований к характеристикам радиоэлектронных изделий заставляет разработчиков искать новые возможности их улучшения. Наличие санкций со стороны стран – производителей микроэлектронных компонентов затрудняет использование их продукции, а отставание отечественных производителей комплектующих микроэлектронных компонентов от мирового уровня заставляют их потребителей искать новые технические решения. В этих условиях наработки отечественных специалистов, в частности, по сложению мощности транзисторов в каскадах усилителей мощности СВЧ-диапазона становятся актуальными[1–3].



3(530).indd 53 04.10.2016 14:50:00

Ранее [4] уже приводилась конструкция многокристального составного ПТШ, которая предполагает суммирование мощности четырёх кристаллов транзисторов. В ней использован принцип сложения мощности кристаллов ПТШ с балочными выводами, каждый из которых присоединяется сразу к контактным площадкам двух кристаллов. Затем эти пары кристаллов соединяются параллельно через балочные выводы, которые, в свою очередь, присоединяются к плёночным проводникам микрополосковой платы ГИС (рис.1, 2).

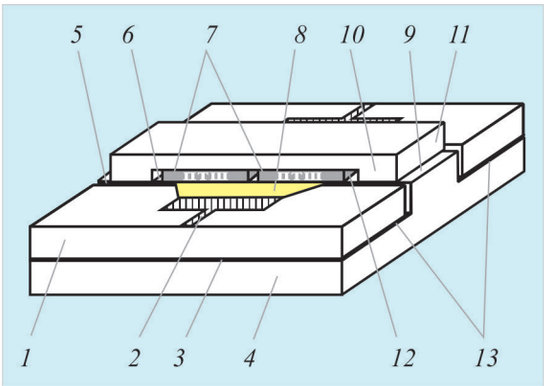



Рис. 1. Фрагмент предложенной мощной ГИС СВЧ:

*1* – диэлектрическая подложка; *2* – топологический рисунок металлизации; *3* – экранная заземляющая металлизация; *4* – металлическое теплоотводящее основание; *5* – отверстие в диэлектрической подложке; *6* – выемка в металлическом основании; *7* – кристаллы транзисторов; *8* – плоские балочные выводы кристаллов транзисторов; *9* – выступ на металлическом теплоотводящем основании; *10* – монтажные площадки; *11* – металлическая хорошо электро- и теплопроводящая пластина (дополнительный теплоотвод); *12* – канавка в металлической хорошо электро- и теплопроводящей пластине; *13* – хорошо электро- и теплопроводящее связующее вещество

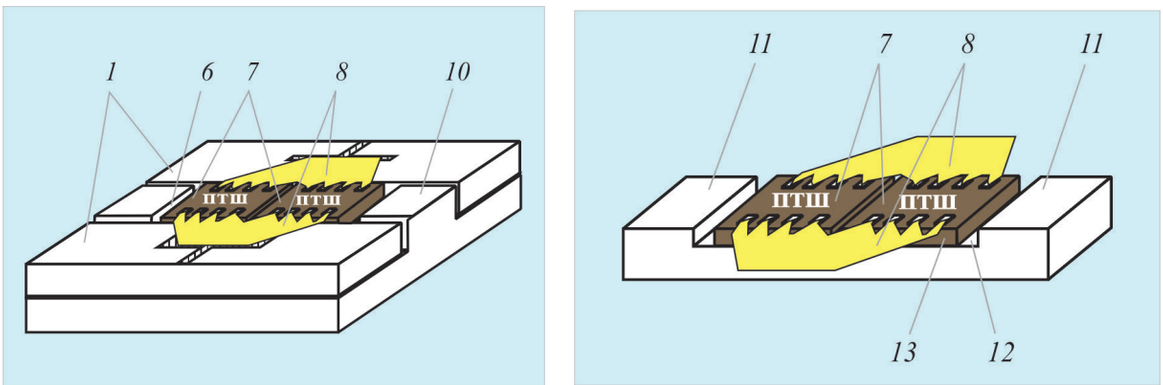



Рис. 2. Составные части фрагмента предложенной мощной ГИС СВЧ (обозначения позиций на рис. 2 такие же, как и на рис. 1)



3(530).indd 54 04.10.2016 14:50:01

Отличительной особенностью конструкции является применение балочных выводов, которые предназначены для присоединения по меньшей мере двух кристаллов ПТШ [5]. Такое присоединение кристаллов предполагает их установку на строго определённом месте и с фиксированным расстоянием между ними. Это позволяет сократить длину внутрисхемных соединительных проводников и тем самым улучшить электрические характеристики ГИС за счёт уменьшения паразитной индуктивности.

Однако близкое расположение кристаллов (всех четырёх) вызывает их тепловое влияние друг на друга, поскольку при работе они выделяют тепло. Поэтому определённый интерес вызывает анализ такого взаимодействия.

## 3. РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

Аналогичная работа проводилась для ГИС с двумя кристаллами, соединёнными параллельно через балочные выводы с интегральным теплоотводом [6]. Поэтому предлагаемую конструкцию можно рассмотреть как модель фрагмента конструкции, в которой две пары двухъярусных (расположенных один над другим) транзисторов *3* (рис. 3). Области тепловыделения кристаллов в паре обращены друг к другу. Нижние транзисторы контактируют с основанием *1* из MD-50, а верхние – с металлической хорошо электро- и теплопроводящей пластиной *2*, материал которой варьировался в широком диапазоне изменения коэффициента теплопроводности ($\lambda$ = = 160…2000 Вт/(м·К)). Между собой транзисторы имеют контакт через золотой балочный вывод *4*.

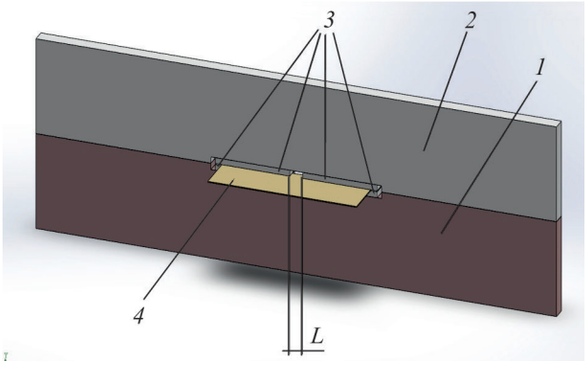



Рис. 3. Общий вид модели фрагмента (половины) конструкции:
*1* – основание; *2* – хорошо электро- и теплопроводящая пластина (дополнительный теплоотвод); *3* – кристаллы транзисторов; *4* – золотой балочный вывод; *L* – горизонтальное расстояние между парами транзисторов

В данной работе было проведено параметрическое исследование влияния горизонтального расстояния между парами транзисторов *L* в диапазоне 0,01…0,3 мм на их тепловой режим.

## 4. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ

Для нахождения температурных полей использовалась вычислительная программа, осуществляющая решение дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов. В данной постановке рассматривалась трёхмерная стационарная задача, описываемая уравнением



3(530).indd 55 04.10.2016 14:50:01

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}=0$$

с граничными условиями: нижняя поверхность основания имеет постоянную температуру ($t$ = 0 ºС); на 4-х поверхностях транзисторов выделяется тепловая мощность $Q$ (плотность теплового потока $q = -\lambda(dt/dn)$; остальные поверхности конструкции находятся в условиях теплоизоляции.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наибольший интерес представляют максимальные уровни температур, возникающие на кристаллах транзисторов в областях выделения мощности, которые локализуются в центральной части этих областей.

Ещё одной целью этой работы является исследование влияния температурных полей соседних групп транзисторов друг на друга в зависимости от расстояния между ними, что тоже приводит к изменению максимальных температур на кристаллах.

Для наглядности результатов минимальный уровень температур устройства, приходящийся на нижнюю поверхность основания, был выбран равным 0 ºС. Эта точка отсчёта позволяет интерпретировать все рассчитанные температуры любой точки конструкции как температурные перепады относительно нижней поверхности основания.

При проведении исследований из-за весьма незначительных изменений результатов при малых мощностях точность численного расчёта температур для выявления закономерностей выбиралась достаточно высокой (до сотых долей градусов). Это позволило установить характер поведения температурных кривых. Обработанные результаты в виде графиков представлены на рис. 4…10.

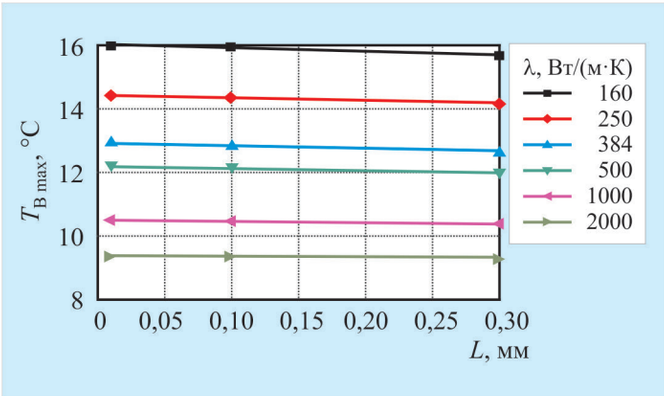



Рис. 4. Зависимости максимальной температуры верхнего кристалла транзистора $t_{B\,max}$ от горизонтального расстояния между соседними парами транзисторов $L$ для различных материалов дополнительного теплоотвода (λ = 160…2000 Вт/(м·К)). $Q$ = 1 Вт на каждом кристалле транзистора

Как видно из рис. 4, максимальная температура верхних кристаллов транзистора зависит от материала электро- и теплопроводящей пластины (дополнительного теплоотвода): чем больше его коэффициент теплопроводности, тем меньше разогревается кристалл. Увеличение горизонтального расстояния между транзисторами $L$ тоже способствует незначительному понижению



3(530).indd 56 04.10.2016 14:50:01

этой температуры, т. к. уменьшается влияние температурных полей соседних пар транзисторов. Чем меньше коэффициент теплопроводности, тем динамичнее это влияние. Об этом говорит крутизна наклона кривой к оси абсцисс.

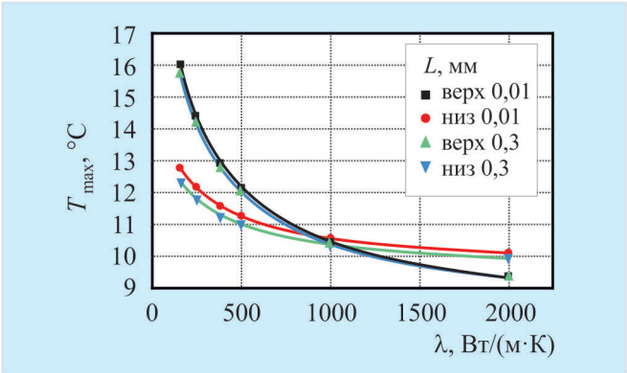



Рис. 5. Зависимости максимальных температур верхнего и нижнего кристаллов транзистора $t_{B\ max}$, $t_{H\ max}$ от коэффициента теплопроводности материала λ дополнительного теплоотвода для различных горизонтальных расстояний между соседними парами транзисторов $L$. $Q$ = 1 Вт на каждом кристалле транзистора

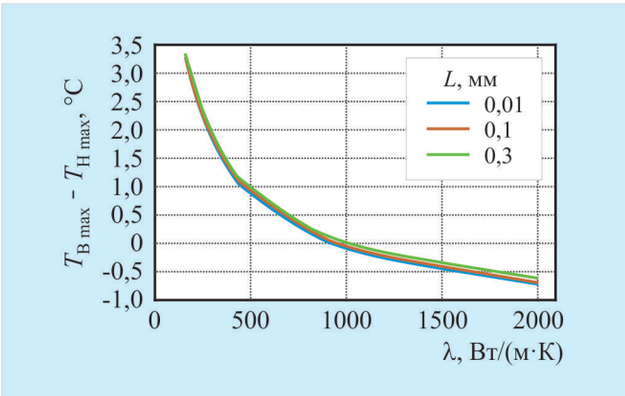



Рис. 6. Зависимости перепада максимальных температур верхнего и нижнего кристаллов транзистора ($t_{B\ max} - t_{H\ max}$) от коэффициента теплопроводности λ материала дополнительного теплоотвода для различных горизонтальных расстояний между соседними транзисторами $L$. $Q$ = 1 Вт на каждом кристалле транзистора

Поведение максимальных температур нижних транзисторов аналогично кривым на рис. 4, но изменение материала электро- и теплопроводящей пластины (т. е. изменение коэффициента теплопроводности) оказывает более слабое влияние на нижние транзисторы, которые лежат на основании из MD-50. Это приводит к тому, что с увеличением коэффициента теплопроводности максимальная температура нижнего кристалла транзистора $t_{H\ max}$, плавно приближаясь по уровню к более высокому значению $t_{B\ max}$, начиная с некоторой величины $\lambda > 500$ Вт/(м·К) сравнивается с ней и при дальнейшем увеличении λ становится выше неё. Это наглядно показывают рис. 5 и 6, на которых изображены температурные зависимости $t_{B\ max}$, $t_{H\ max}$ от коэффициента теплопроводности материала электро- и теплопроводящей пластины (дополнительного теплоотвода) для двух крайних значений $L$ (0,01 и 0,3 мм).



3(530).indd 57 04.10.2016 14:50:01

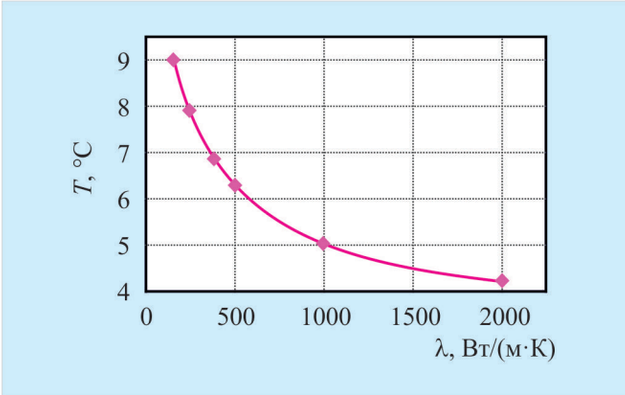



Рис. 7. Максимальные температуры $T$ верхней кромки скобы в зависимости от её коэффициента теплопроводности λ для горизонтального расстояния $L$ 0,15 мм между соседними парами транзисторов. $Q$ = 1 Вт на каждом кристалле транзистора

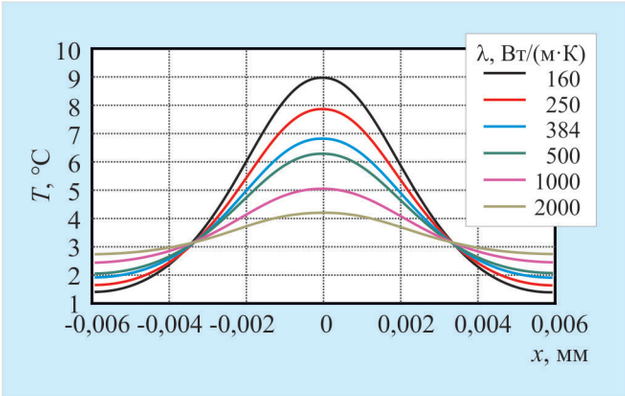



Рис. 8. Распределение температур $T$ по верхней кромке дополнительного теплоотвода для случая $L$ = 0,2 мм в зависимости от коэффициента теплопроводности λ дополнительного теплоотвода

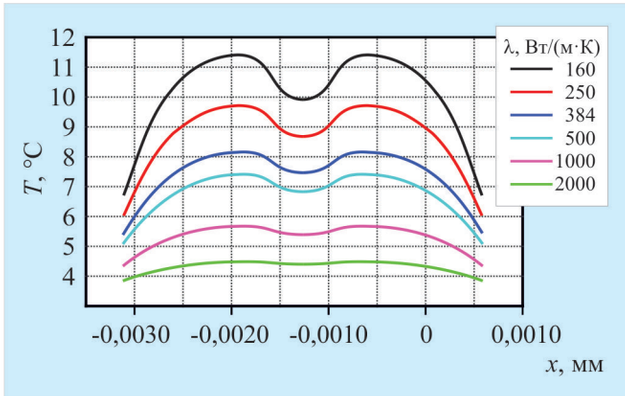



Рис. 9. Распределение температур $T$ по верхней кромке дополнительного теплоотвода при $L$ = 0,3 мм для различных материалов дополнительного теплоотвода. $Q$ = 1 Вт на каждом кристалле транзистора



3(530).indd 58 04.10.2016 14:50:01

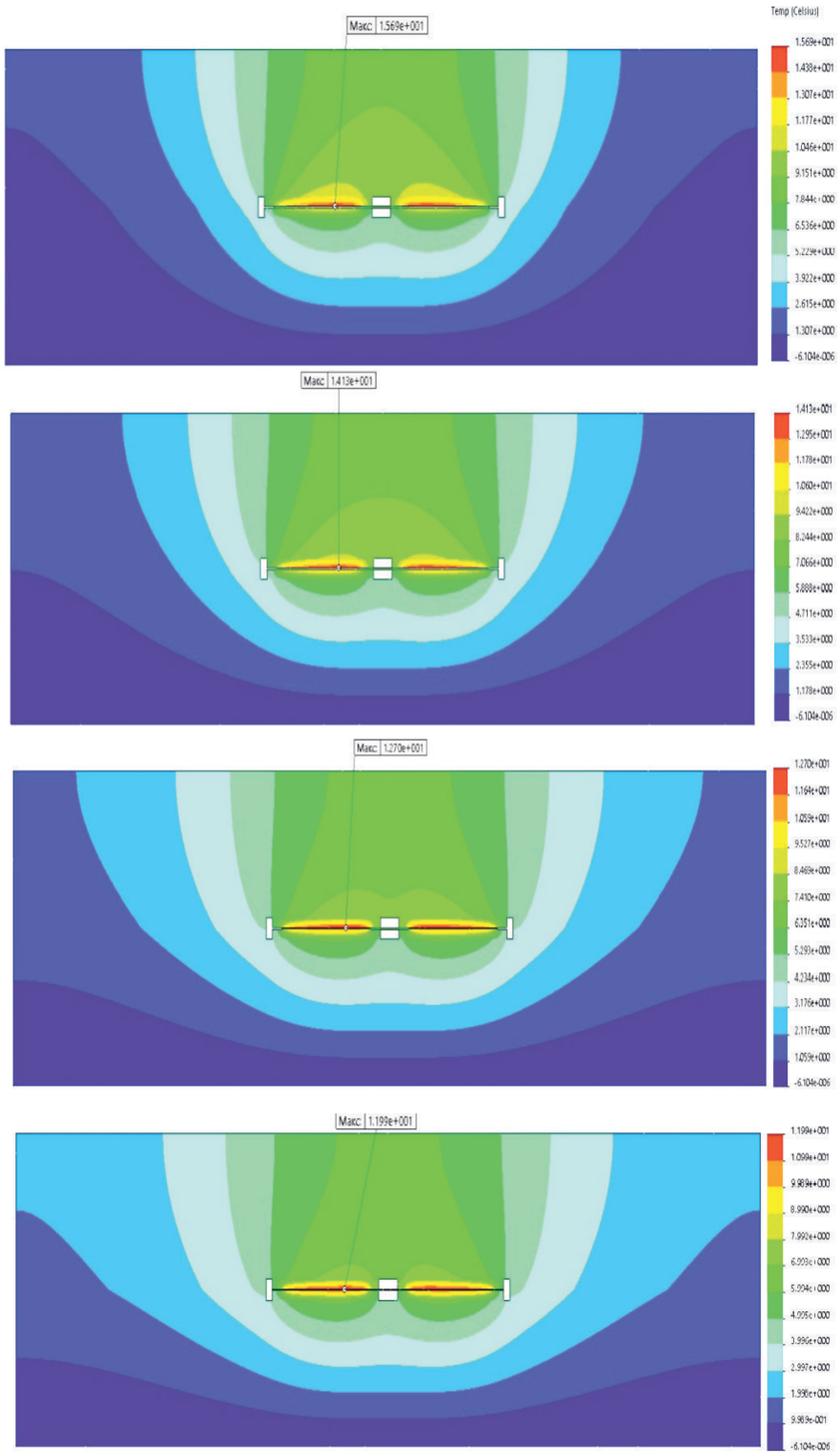



Рис.10. Тепловые поля в вертикальном продольном срединном сечении конструкции, возникающие при выделении мощности $Q$ = 1 Вт с каждого кристалла транзисторов для $L$ = 0,3 мм. Теплопроводность дополнительного теплоотвода составляет соответственно 160, 250, 384, 500, 1000, 2000 Вт/(м·К) (начало, см. также с. 60)



3(530).indd 59 04.10.2016 14:50:01

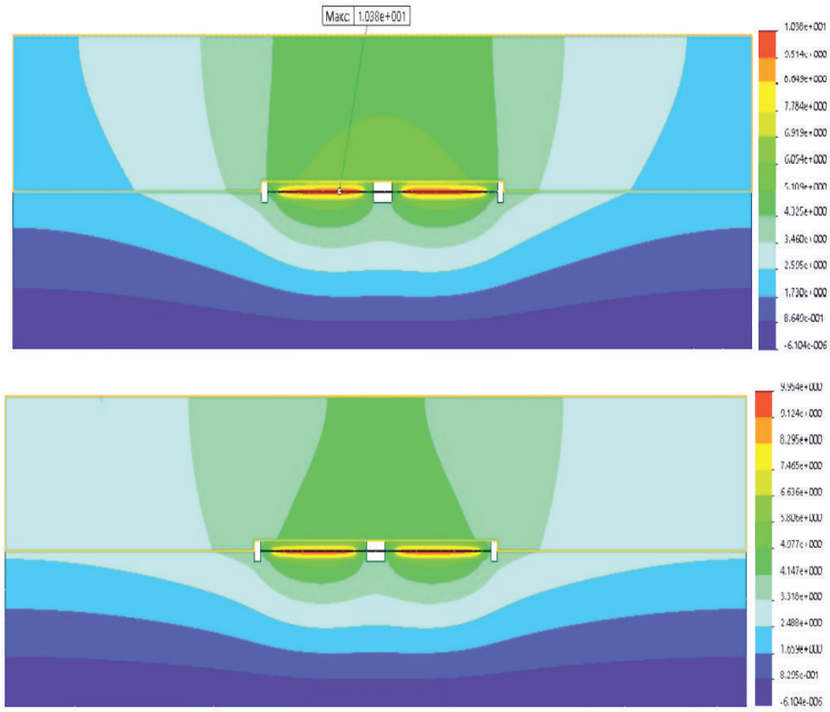



Рис.10. Тепловые поля в вертикальном продольном срединном сечении конструкции, возникающие при выделении мощности $Q$ = 1 Вт с каждого кристалла транзисторов для $L$ = 0,3 мм. Теплопроводность дополнительного теплоотвода составляет соответственно 160, 250, 384, 500, 1000, 2000 Вт/(м·К) (окончание)

Зависимость перепада максимальных температур верхнего и нижнего кристаллов транзистора ($t_{\text{В max}} - t_{\text{Н max}}$) от горизонтального расстояния между соседними транзисторами $L$ для различных материалов верхней скобы при выделении мощности с одного кристалла $Q$ = 1 Вт представлена на рис. 6. Перепад температур с изменением λ меняет свой знак:

$$(t_{\text{В max}} - t_{\text{Н max}}) > 0, \text{ если } \lambda \le 500 \text{ Вт/(м·К)},$$
$$(t_{\text{В max}} - t_{\text{Н max}}) \le 0, \text{ если } \lambda > 500 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Увеличение горизонтального расстояния $L$ между соседними транзисторами тоже приводит к снижению температурного перепада, причём чем больше λ, тем сильнее эта тенденция.

Дальнейшие успехи в создании более мощных транзисторов приведут к замене группы из 4-х кристаллов на один более мощный транзистор. В этом случае значительно сокращается площадь теплового контакта, что ухудшает условия отвода тепла. Вместе с этим сокращается длина соединительных проводников, что снижает паразитную индуктивность схемы. Однако более мощные кристаллы также могут быть объединены в группу для суммирования мощности, и таким образом разработанная конструкция имеет перспективы для использования.



3(530).indd 60 04.10.2016 14:50:02

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований можно сделать следующее заключение.

Увеличение коэффициента теплопроводности электро- и теплопроводящей пластины приводит к снижению ее уровня температур за счёт увеличения эффекта интегрального теплоотвода. Это приводит к охлаждению транзистора, контактирующего с пластиной дополнительного теплоотвода.

С ростом коэффициента теплопроводности электро- и теплопроводящей пластины наблюдается смещение максимума температур с верхнего кристалла транзистора на нижний.

Разработанная конструкция ГИС СВЧ предполагает использование кристаллов более мощных транзисторов (до нескольких десятков ватт), появляющихся в последнее время.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2298255 РФ.** Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. Г. Лапин, В. Г. Моргунов. – Приоритет 12.08.05.

2. **Иовдальский, В. А.** Улучшение характеристик ГИС выходного каскада усилителя мощности СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. Г. Лапин, В. Б. Трегубов, Ю. И. Молдованов, А. М. Коцюба // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 4 (527). – С. 63 – 67.

3. **Иовдальский, В. А.** Сложение мощности ПТШ в ГИС усилительных каскадов СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина, В. А. Пчелин // LAP LAM-BERT. Academic Publishing. Omni Scriptum GmbH and C0.KG. Heinrich-Bucking-Str. 6-8, 66121 Saarbrucken / Deutschland. 06.07.2015. ISBN978-3-659-74888-2, p.120.

4. **Иовдальский, В. А.** Многокристальный составной ПТШ для ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. Г. Лапин, В. А. Пчелин, Д. С. Гринберг // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 4 (527). – С. 74 – 76.

5. **Пат. 2541725 РФ, МПК H 01 L 23/48.** Выводная рамка для многокристального полупроводникового прибора СВЧ / В. А. Иовдальский, К. В. Дудинов, В. Г. Моргунов, Т. С. Кудрова. – Приоритет 23.07.2013.

6. **Иовдальский, В. А.** Тепловой анализ работы мощной ГИС с интегральным теплоотводом от кристаллов полупроводниковых приборов / В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2012. – Вып. 2 (513). – С. 57 – 74.

*Статья поступила 16 августа 2016 г.*



3(530).indd 61 04.10.2016 14:50:02

# РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.6.029.64.019.3

## ОБ АПОСТЕРИОРНОЙ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

**П. В. Куприянов, О. И. Обрезан, Д. С. Трофимов**

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

**Обсуждается проблема оценки надежности сложных радиоэлектронных устройств СВЧ единичного и мелкосерийного производства. Обращено внимание на сложность достоверного подтверждения заданной надежности указанных изделий на стадии производства. Делается вывод о перспективности апостериорного оценивания надежности на стадии эксплуатации. Приводятся основы методологии последовательного анализа безотказности и графическое отображение апостериорной методики. Отмечается основное достоинство апостериорной методики – наилучшая статистика. Делается вывод о необходимости корректировки нормативной базы, регламентирующей действия участников процесса производства и эксплуатации изделий.**

*КС: надежность, безотказность, СВЧ, апостериорная оценка, последовательный план испытаний, линия реализации плана*

## ON POSTERIOR RELIABILITY ESTIMATE OF MICROWAVE COMPLICATED RADIO ELECTRON DEVICES

**P. V. Kupriyanov, O. I. Obrezan, D. S. Trofimov**

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

**The problem of reliability estimate of microwave complicated radio electron devices of single-unit and small lot productions is under discussion. The attention is paid to the complexity of authentic acknowledgement of preset reliability of the given products at the stage of production. The conclusion is drawn about prospectivity of posterior reliability estimate at the stage of operation. The foundations of methodology of faultness successive analysis and graphic representation of posterior methodology have been given. The main advantage of posterior methodology – the best statistics – is marked. The conclusion is made about the necessity of correcting the normative basis regulating the work of participants of production process and system maintenance.**

*Keywords: reliability, faultness, microwave, posterior estimate, successive tests plan, plan realization line*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества и надежности радиоэлектронных устройств (РЭУ) СВЧ – составных частей радиоэлектронных средств (СЧ РЭС) [1] традиционно является одной из основных современных тенденций развития отечественного радиоэлектронного комплекса. На это направлены значительные усилия и ресурсы как предприятий – разработчиков и производителей РЭУ СВЧ и РЭС, так и всей вертикально ориентированной структуры управления отраслью [2].



3(530).indd 62 04.10.2016 14:50:02

Существует обширная база нормативных и методических документов, определяющих способы задания и методы подтверждения соответствия показателей надежности заданным требованиям. Она достаточно адекватна задачам оценивания надежности изделий электронной техники и сравнительно простых РЭУ при их крупносерийном производстве, когда может быть сформирована репрезентативная выборка образцов для проведения испытаний.

При задании требований надежности сложной и дорогостоящей продукции единичного и мелкосерийного производства, к которой относятся РЭУ СВЧ, и оценивании ее соответствия заданным требованиям возникают следующие проблемы:

– на этапе формирования ТЗ трудно прогнозировать значения показателей безотказности неразработанного изделия с желаемой достоверностью;

– оценивание соответствия требованиям надежности, и прежде всего безотказности, приходится производить на основе анализа испытаний минимального количества образцов при ограниченной продолжительности испытаний. Эти обстоятельства могут приводить к существенным ошибкам в оценках, что недопустимо в силу важности обеспечения работоспособного состояния аппаратуры при выполнении предусмотренных для нее функций.

Настоящая статья посвящена обсуждению некоторых аспектов экспериментального подтверждения заданных и оценивания истинных показателей безотказности сложных РЭУ СВЧ на основе обработки результатов эксплуатации.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом последующего анализа являются РЭУ СВЧ – продукция единичного и мелкосерийного производства, характеризуемого малым объемом выпуска образцов конкретного типа за определенный период, сопоставимым с размером выборки для проведения контрольных (ресурсных) испытаний на безотказность по [3–5].

Для восстанавливаемых РЭУ СВЧ – СЧ РЭС в качестве контролируемого показателя безотказности, как правило, используется показатель «средняя наработка на отказ $T_o$», характеризующий среднюю продолжительность безотказной работы [6, 7].

Для оценивания соответствия изделий требованию безотказности в виде $T_o$ экспериментальным методом в [3] предусмотрено два плана испытаний: с одноступенчатым контролем и с последовательным усеченным контролем безотказности. Одноступенчатый контроль в основном ориентирован на невосстанавливаемые изделия и в данной работе не рассматривается.

При последовательном усеченном плане испытаний образцы последовательно или одновременно подвергаются испытанию до получения заданного числа отказов или до достижения заданной суммарной наработки рассматриваемой выборки. Отказавшие в процессе испытаний образцы восстанавливаются или заменяются новыми. Начальный размер выборки не лимитируется, а ее суммарный размер определяется в процессе испытаний.

Совокупность исходных параметров в соответствии с [3] включает в себя: α – риск поставщика; β – риск потребителя; $T_\beta$ – браковочный уровень средней наработки на отказ; $D = T_\alpha / T_\beta$ – разрешительный коэффициент, где $T_\alpha$ – приемочный уровень средней наработки на отказ.

Выбор численных значений указанных выше параметров для планирования испытаний остается за поставщиком и потребителем. Эти значения являются компромиссным результатом обсуждения при разработке технических условий или другой поставочной документации.

В ходе испытаний по последовательному усеченному методу контролируются суммарная



3(530).indd 63 04.10.2016 14:50:02

наработка испытанных образцов $t_{\Sigma}$, количество отказов $r$ и моменты отказов $t_r$. Испытания прекращаются при достижении одного из запланированных показателей: $r = r^*$ ($r^*$ – браковочное значение) или $t_{\Sigma} \geq t_{\Sigma пр}$ ($t_{\Sigma пр}$ – запланированное приемочное значение суммарной наработки выборки). Значения $r^*$ и $t_{\Sigma пр}$ для варианта усеченного последовательного контроля приведены в [3].

Усеченный последовательный план испытаний ориентирован на применение в тех случаях, когда есть ограничения на объем испытания, но решение по результатам испытания необходимо принять оперативно, в течение конечного времени. При этом очевидно, что ограничение объема испытаний приводит к повышению риска принятия ошибочного решения относительно соответствия изделия требованию по безотказности как для поставщика, так и для потребителя. Метод, в настоящем его виде, ориентирован не на оценивание фактического значения показателя безотказности, а на подтверждение соответствия установленному априорно требованию по альтернативному признаку с фиксированными значениями β и α.

Если при установленных параметрах плана соответствие норме $T_o$ не подтверждается, то фиксируется условно отрицательный результат испытаний с соответствующими последствиями. Результат отрицательный условно потому, что изменением совокупности (α, β, $T_{\beta}$, $D$) применительно к полученной экспериментально последовательности отказов $t_1, t_2, \ldots, t_r$ можно получить или положительный результат, или результат, при котором испытание должно быть продолжено для получения возможного положительного результата в дальнейшем. Но ни у потребителя, ни у поставщика нет оснований для таких действий, так как процедурно-действующей нормативной базой они не предусмотрены.

Между тем представляется крайне расточительным браковать сложное дорогостоящее изделие по результатам усеченных испытаний, спланированных по априорным исходным данным с некоторой долей информационной неопределенности. Поэтому для сложных РЭУ СВЧ методологию планирования и оценивания результатов испытаний на безотказность [8 (§4.4), 9] предлагается адаптировать к особенностям разработки, изготовления и эксплуатации РЭУ СВЧ в составе аппаратуры. При этом конечной целью испытаний выборки образцов по последовательному плану должно быть повышение доверительной вероятности подтверждения показателей безотказности. Решение этой задачи может быть получено только при увеличении объема контрольных испытаний.

Предположим, что время испытаний не слишком лимитировано, а вероятность принятия ошибочного решения должна быть сведена к минимуму. Точнее, если основной интерес представляет не оценивание соответствия изделия априори заданным требованиям по альтернативному признаку, а определение фактического, заранее неизвестного значения параметра безотказности с приемлемой достоверностью. В таком случае изначальная методология проверки соответствия заданным требованиям по надежности, положенная в основу последовательного усеченного плана испытаний, должна быть дополнена решением новой задачи – апостериорным оцениванием безотказности РЭУ СВЧ.

Независимо от используемой процедуры оценивания показателей безотказности РЭУ СВЧ на стадии производства, т. е. в условиях ограниченных технико-экономических возможностей и поставщика и потребителя, формирование необходимого объема испытаний представляет практически нерешаемую задачу. В нормативных документах, регламентирующих взаимоотношения потребителя и поставщика изделий, декларируется необходимость предпринимать совместные усилия для непрерывного и планомерного повышения качества, включая надеж-



3(530).indd 64 04.10.2016 14:50:02

ность, поставляемой продукции, в том числе и СЧ РЭС. Поэтому формирование и использование упорядоченного потока сведений о наработке и отказах РЭУ СВЧ при эксплуатации в составе аппаратуры представляется актуальной задачей, решение которой может способствовать преодолению информационной недостаточности для достоверного оценивания показателей безотказности сложных, трудоемких и дорогих изделий СВЧ на стадии производства.

## 3. ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА БЕЗОТКАЗНОСТИ

В соответствии с [8], методология последовательного анализа безотказности некоторого объекта, для которого известна выборка случайных значений наработки до отказа $t_1, t_2, t_3,\ldots, t_r$, принадлежащих к генеральной совокупности с функцией плотности распределения $\varphi_1(t|\theta)$, основана на решении задачи математической статистики о проверке простой гипотезы $H_0$ о том, что $\theta = \theta_0$, против простой альтернативы $H_1$, что $\theta = \theta_1 < \theta_0$, где $\theta_0$ и $\theta_1$ – априори заданные величины. Правило выбора одного из двух решений – принятие или отклонение гипотезы $H_0$ – устанавливается заранее и состоит в следующем. Все пространство возможных значений случайной величины $t$ разбивается на две непересекающихся области, $T_o$ и $T_1$. Если данная выборка $t_1, t_2, t_3,\ldots, t_r$ (точка в $r$-мерном пространстве) попадает в область $T_o$, то принимается гипотеза $H_0$ (решение $\gamma_0$), а если эта точка попадает в область $T_1$, то гипотеза $H_0$ отклоняется (решение $\gamma_1$).

Отнесение конкретной выборки $t_1, t_2, t_3,\ldots, t_r$ к области $T_o$ или $T_1$ сопряжено с возможностью совершения ошибки первого рода (решение $\gamma_1$, при том что в действительности выборка принадлежит области $T_o$) или второго рода (отнесение выборки к области $T_o$, при том что в действительности она принадлежит области $T_1$). В общем случае допустимая вероятность ошибки первого рода задается величиной $\alpha$, ошибки второго рода – величиной $\beta$.

Существует множество способов разбиения выборочного пространства на области $T_o$ и $T_1$ в зависимости от вида функции плотности распределения $\varphi_1(t|\theta)$, значений величин $\alpha$ и $\beta$ и других параметров. Задача состоит в том, чтобы в любом варианте при заданном критерии качества объектов (величины $\theta_0$) определить оптимальное правило принятия решения о подтверждении или отклонении гипотезы $H_0$.

Применительно к экспоненциальному закону ($\varphi_1(t|\theta) = (1/\theta)\cdot\exp(-t/\theta)$) надежности пространство возможных значений $[r, \theta]$ разбивается на области $T_o$ и $T_1$ линиями соответствия

$$r = a(t_\Sigma/T_\alpha - T_o/T_\alpha) \tag{1}$$

и несоответствия

$$r = a(t_\Sigma/T_\alpha) + r_0, \tag{2}$$

где $a = (D - 1)/\ln(D)$; $T_o/T_\alpha = (\ln((1 - \beta)/\alpha))/(D - 1) = \theta_0$; $r_0 = [\ln((1 - \alpha)/\beta)]/1\mathrm{n}(D)$; $D = T_\alpha / T_\beta$ – так называемый разрешающий коэффициент.

В соотношениях (1) и (2) величина $T_\alpha$ – приемочное значение $T_o$; $T_\beta$ – браковочное значение $T_o$ из возможных значений $T_o$, определенных рассматриваемым методом последовательных испытаний на безотказность.

Выбор значения $T_\beta$ – результат компромисса межу желаниями потребителя и поставщика. Первый стремится установить $T_\beta$ возможно ближе к заданному значению $T_o$, а второй – к возможно меньшему значению $T_\beta$, чтобы уменьшить объем испытаний.



3(530).indd 65 04.10.2016 14:50:02

## 4. ГРАФИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ АПОСТЕРИОРНОЙ МЕТОДИКИ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Методику апостериорной оценки надежности в ходе эксплуатации представляется целесообразным для наглядности изобразить графически. За основу возьмем аналогично [3] диаграмму для последовательного плана, но без предварительного ограничения числа отказов и продолжительности испытаний.

Рассмотрим графическое отображение пространства [$r$, θ], представленное диаграммой, показанной на рисунке. На диаграмме изображена гипотетическая линия реализации плана (ЛРП) испытаний, расположенная между ограничительными линиями «соответствия» *1* и «несоответствия» *2* в координатах {$r$, θ}. Положение ограничительных линий определяется только значениями рисков изготовителя α, потребителя β и значением разрешительного коэффициента $D$. Поэтому на диаграмме может быть отображено неограниченное количество границ разбиения пространства при заданном значении разрешительного коэффициента $D$.

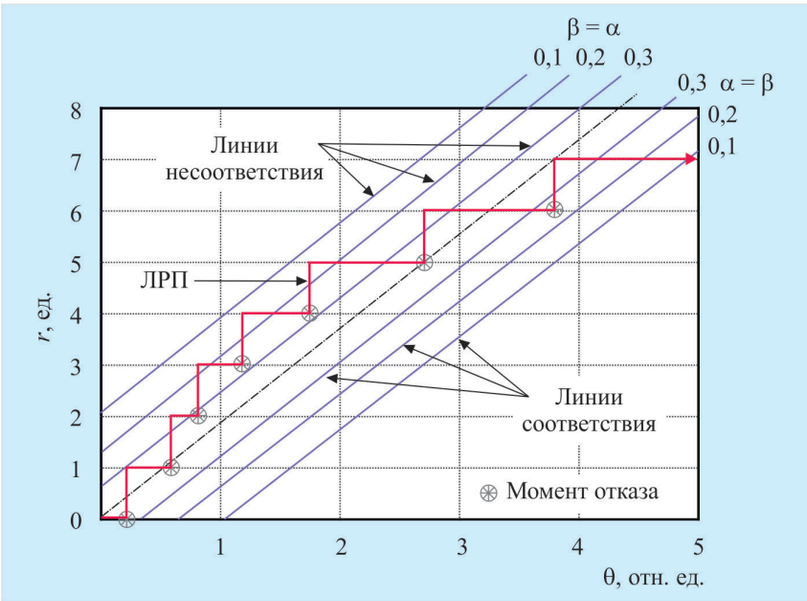



Диаграмма последовательного анализа данных о наработке образцов изделия в ходе эксплуатации

Исходные данные для диаграммы – значения α, β, $D$ и др. – приведены в табл. 1. В той же таблице приведены ожидаемые значения суммарной наработки выборки образцов РЭУ СВЧ на стадии эксплуатации, необходимые для подтверждения соответствия изделия требованиям к средней наработке на отказ при разных значениях рисков изготовителя и потребителя.

Эксплуатацию РЭУ СВЧ в аппаратуре можно рассматривать как «испытание» некоторого количества образцов изделий в режимах и условиях воздействия реальных внешних воздействующих факторов. Отказавшие в процессе эксплуатации образцы заменяются новыми, вновь изготовленными, или отремонтированными по обезличенному способу. Если выделить группировку из $N$ образцов аппаратуры и наблюдать за состоянием образцов РЭУ – наработкой и отказами, то может быть сформирован поток данных, вполне подходящих для их отражения на диаграмме в виде ЛРП.



3(530).indd 66 04.10.2016 14:50:02

Таблица 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha = \beta$ | $\alpha$ | $r_0$ | $\theta_0 = T_o/T_\alpha$ | $\theta_{\Sigma\,max} = t_\Sigma/T_\alpha$ | $t_{\Sigma\,min.ож}$, ч | $t_{\Sigma\,max.ож}$, ч |
| 0,3 | 1,8205 | 0,77124 | 0,42365 | 2,0716 | 10168 | 49718 |
| 0,2 | 1,8205 | 1,26185 | 0,69315 | 2,34107 | 16635 | 56184 |
| 0,1 | 1,8205 | 2,0 | 1,09861 | 2,77758 | 26367 | 66662 |

*Примечания*: 1. $T_o$ = 20 000 ч, $T_\beta = 0{,}4T_0$; $T_\alpha = 1{,}2T_o$; $D = 3$.

2. В столбцах 6 и 7 приведены границы ожидаемых значений суммарной наработки, необходимой для подтверждения соответствия РЭУ требованию $T_o \geq 20\,000$ ч, определенных для усеченных испытаний при $r = 3$.

Рассмотрим подробно показанную на диаграмме гипотетическую ЛРП перманентного последовательного анализа безотказности изделия по данным о наработке образцов в процессе эксплуатации в аппаратуре. Видно, что если контроль осуществляется при $\beta = 0{,}3$, т. е. при повышенной вероятности ошибки первого рода, то уже после 2-го отказа испытание должно быть прекращено с результатом «не соответствует». При продолжении испытаний до следующего отказа ($r = 3$) возникает ситуация, когда решение о прекращении испытания может не приниматься, если контроль осуществлять по $\alpha = \beta = 0{,}2$, т. е. с меньшей вероятностью ошибки первого и второго родов. Дальнейший ход ЛРП при отсутствии ограничения по числу отказов иллюстрирует возможность пересечения с линией «соответствия» при $\alpha = \beta = 0{,}1$ после семи отказов.

Конечный итог гипотетических испытаний таков: с высокой степенью достоверности ($\alpha = \beta = 0{,}1$) испытуемая выборка изделий соответствует требованиям по надежности, т. е. имеет среднюю наработку $T_o \geq 20\,000$ ч. Другой возможный результат тех же испытаний обратный: для $\beta = 0{,}3$ следовало бы зафиксировать «несоответствие» после 2-го отказа. Таким образом, проиллюстрирована возможность кардинального влияния повышенной вероятности ошибки первого рода при экспериментальном подтверждении надежности на его результаты.

Для уменьшения вероятности принятия некорректных решений необходимо улучшение статистики. Рассматриваемая диаграмма является наглядным способом представления данных об отказах и наработке образцов на стадии эксплуатации. Ясно, что с увеличением массива данных решение о «соответствии» или «несоответствии» принимается с меньшими значениями риска потребителя и поставщика, но при одних и тех же значениях $T_\beta$ и $T_\alpha$. Изменяя сетку граничных линий путем увеличения значения $T_\beta$ и уменьшения значения разрешающего коэффициента $D$, можно оценить риски потребителя, при которых значения $T_\beta$ и $T_\alpha$ будут, по возможности, близки к $T_o$.

Есть еще некоторые аспекты проблемы экспериментального подтверждения заданной безотказности в ходе эксплуатации, которые необходимо учитывать при планировании, проведении и обработке результатов испытаний:

– при производственных испытаниях некоторой выборки образцов изделия на момент контроля известна наработка всех образцов выборки, как отказавших, так и находящихся в работоспособном состоянии;

– при испытаниях РЭУ в ходе эксплуатации обычно по результатам рекламационной работы достоверно известна только наработка отказавших образцов.



3(530).indd 67 04.10.2016 14:50:02

В этом случая ЛРП на диаграмме всегда будет смещена к линии «несоответствия». Следовательно, вероятность ошибки первого рода оказывается необоснованно высокой. Чтобы воспользоваться преимуществами «испытания», в ходе эксплуатации необходимо организовывать упорядоченный контроль наработки всех образцов РЭУ в составе выделенной группировки аппаратуры. Для этого нужны совместные усилия поставщика и потребителя изделия, закрепленные взаимными обязательствами о регламенте информационного обмена при эксплуатации изделия в составе аппаратуры.

## 5. МОНИТОР НАДЕЖНОСТИ

Последовательный анализ экспериментальных данных о наработке и отказах РЭУ СВЧ при эксплуатации позволяет получить важный результат – оценку соответствия изделия требованиям по безотказности. Однако не менее интересен другой важный аспект – оценка фактического уровня параметров безотказности.

Изменения конструкции и технологии изготовления РЭУ СВЧ, неизбежно происходящие при производстве изделий, направлены на совершенствование как их функциональных характеристик, так и параметров надежности. Результат улучшения функциональных характеристик виден сразу при измерениях электрических, массогабаритных параметров и т. п. Что касается повышения надежности, то результат становится осязаемым только по истечении некоторого времени. Рассмотрим некоторые возможности оперативной оценки безотказности с приемлемой достоверностью.

Линия реализации плана, изображенная на рисунке, отображает поток отказов восстанавливаемого изделия без учета времени восстановления отказавших образцов. В предположении, что поток отказов РЭУ СВЧ является ординарным, его можно рассматривать как нестационарный пуассоновский поток, для которого, в соответствии с [8], среднее число отказов на интервале наработки $\Delta t = t - t_0$ определяется выражением

$$H(t, t_0) = \int_{t_0}^{t} \lambda(t)dt. \tag{3}$$

Откуда следует

$$\lambda(\Delta t) = r_{\Delta}/\Delta t, \tag{4}$$

где $r_{\Delta}$ – учитываемое число отказов на интервале наработки $\Delta t$.

Величину интенсивности отказов $\lambda(\Delta t)$ можно рассматривать как характеристику качества выпускаемой продукции по эксплуатационной надежности (безотказности) для данного конкретного момента наблюдения.

Величина $\lambda(\Delta t)$ представляет точечную оценку интенсивности отказов и является постоянной величиной на выбранном фиксированном интервале $\Delta t$ со значительной дисперсией возможных значений $\sigma^2_{\lambda} = \lambda(\Delta t)$.

Более информативной для мониторинга безотказности является интервальная оценка, определенная в виде нижней $\lambda^{н}(\Delta t)$ и верхней $\lambda^{в}(\Delta t)$ границ возможных значений интенсивности отказов на интервале $\Delta t$ с некоторой приемлемой доверительной вероятностью $q$. В пуассоновском приближении для плана испытаний [NRr] [5] можно определить верхнюю и нижнюю границы возможных значений интенсивности отказов при доверительной вероятности $q \geq 0{,}6$ по формулам:

$$\lambda^{в}(\Delta t) = \lambda(\Delta t)\cdot(\chi^2_{(q)}(2r))/(2\cdot(r-1)), \tag{5}$$



3(530).indd 68 04.10.2016 14:50:02

$$\lambda^{н}(\Delta t) = \lambda(\Delta t)\cdot(\chi^2_{(1-q)}(2r))/(2\cdot(r-1)), \quad (6)$$

где $\chi^2_{(q)}(2r)$ и $\chi^2_{(1-q)}(2r)$ – квантили распределения с $2r$ степенями свободы. Значение одной из границ (например, нижней) можно использовать в качестве численной оценки параметров безотказности изделия.

При использовании статистических оценок выборки значений наработки до отказа $t_1$, $t_2$, $t_3$,…$t_n$ для мониторинга качества изделия по безотказности исследуемая выборка должна быть однородной, например все образцы должны принадлежать к одной партии. В случае существенной корректировки конструкторской или технологической документаций мониторинг безотказности выборки вновь изготовленных образцов изделий должен осуществляться автономно.

По определению, значение интервала $\Delta t$ должно быть значительно меньше $t_{\Sigma\ max.ож}$. В то же время количество отказов на интервале $\Delta t$ должно быть достаточным, чтобы выполнялось условие для величины δ, имеющей физический смысл предельного отклонения:

$$\chi^2_{(q)}(2r)/2\cdot(r-1) - \chi^2_{(1-q)}(2r)/\ 2\cdot(r-1) = \delta < 2. \quad (7)$$

В табл. 2 приведены расчетные значения δ и $\lambda^{н}(\Delta t)/\ \lambda(\Delta t)$ в зависимости от числа отказов $r$.

Таблица 2

| $r$ | $\chi^2_{(q)}(2r)$ | $\chi^2_{(1-q)}(2r)$ | $\chi^2_{(q)}(2r) - \chi^2_{(1-q)}(2r)$ | $2\cdot(r-1)$ | δ | $\lambda^{н}(\Delta t)/\lambda(\Delta t)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,836 | 1,023 | 0,812 | 0 | Не определена | – |
| 2 | 4,039 | 2,758 | 1,281 | 2 | 0,6405 | 1,379 |
| 3 | 6,205 | 4,564 | 1,641 | 4 | 0,41 | 1,1635 |
| 4 | 8,352 | 6,430 | 1,922 | 6 | 0,32 | 1,0717 |
| 5 | 10,479 | 8,291 | 2,188 | 8 | 0,2735 | 1,0364 |

Из табл. 2 видно, что на каждом частном интервале $\Delta t$ желательно объединять количество отказов не менее 3-х. Количество учитываемых отказов влияет на точность производимых оценок.

В заключение рассмотрения подходов к методике оперативной оценки показателей надежности в ходе эксплуатации важно отметить, что для внедрения процедуры в полном объеме требуется совершенствование нормативной базы, регламентирующей действия участников процесса на всех этапах жизненного цикла изделий. Необходима двусторонняя обратная связь между поставщиком и потребителем, в результате которой информация о реальной надежности аппаратуры будет регулярно формироваться, обновляться и находить заинтересованного адресата.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в настоящей публикации методика оценивания надежности сложных РЭУ СВЧ в ходе эксплуатации имеет одно важное достоинство – она основана на обработке максимально



3(530).indd 69 04.10.2016 14:50:02

возможной статистики, не достижимой для поставщика в процессе производства изделий. В формировании выборки могут участвовать все образцы изделия, произведенные в течение времени эксплуатации. Такой подход, с одной стороны, дает поставщику наиболее достоверную информацию для перманентного мониторинга и управления качеством производимой продукции, а с другой – не слишком обременителен для потребителя и поставщика, поскольку не требует регулярных затрат на проведение ресурсных испытаний образцов РЭУ СВЧ при производстве. Предлагаемая процедура является, вероятно, наиболее корректным источником информации для корректировки документации в части продления назначенных ресурсов сложной дорогостоящей аппаратуры, изменения состава и порядка пополнения ЗИП и т. п.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **ГОСТ Р 52003-2003.** Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.

2. **Бочкарев, О. И.** Мы решаем задачу технологической независимости / О. И. Бочкарев // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2015. – № 7 (00147). – С. 10 – 17.

3. **ГОСТ 402-95.** Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение.

4. **ГОСТ Р 27.403-2009.** Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы.

5. **РД 50-690-89.** Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным.

6. **ГОСТ 27.002-89.** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

7. **ГОСТ 27.003-90.** Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

8. **Левин, Б. Р.** Теория надежности радиотехнических систем / Б. Р. Левин. – М.: Советское радио, 1978.

9. Надежность радиоэлектронных систем. Инженерные методы исследования надежности радиоэлектронных систем / Пер. с англ. – М.: Советское радио, 1968. – С. 197 – 210.

*Статья поступила 15 августа 2016 г.*



3(530).indd 70 04.10.2016 14:50:02

УДК 621.396.62

# КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ППМ «Аббат-И» С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО КОНТАКТНОГО СОЕДИНИТЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СВЧ-ЭНЕРГИИ И НЧ-СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

**М. С. Карасев, В. А. Жерновенков**

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

**Рассмотрены основные схемотехнические и конструктивные особенности разработки приемопередающего модуля «Аббат-И», а также представлено обоснование использования поверхностного контактного соединения модулей в составе АФАР. Описываются основные характеристики СВЧ- и НЧ-соединителей, обеспечивающих поверхностное контактное соединение, и их конструкция. Основное внимание уделено разработке измерительной оправки для контроля выходных параметров приемопередающего модуля, а также ее составных элементов.**

*КС: поверхностный контактный соединитель, ППМ, измерительная оправка*

# THE DESIGN PECULIARITIES OF TRANSMITTER-RECEIVER MODULE “Abbat-И” USING SURFACE CONTACT CONNECTOR FOR TRANSMITTING MICROWAVE ENERGY AND LOW FREQUENCY SIGNALS OF CONTROL AND ELECTRIC POWER SUPPLY

**M. S. Karasev, V. A. Zhernovenkov**

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

**The main network and design peculiarities of developing transmitter-receiver module «Abbat-И» have been considered, the evidence of using the surface contact connection of modules within the active phased array is also presented. The main characteristics of microwave and low-frequency connectors, providing surface contact connection, as well as their design are described. Special attention is paid to development of a test fixture to control output parameters of the transmitter-receiver module and its constituent elements.**

*Keywords: surface contact connector, TRM, text fixture*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В радиолокации в настоящее время широко применяются активные фазированные антенные решётки (АФАР), которые позволяют суммировать в пространстве мощности входящих в их состав приемопередающих модулей (ППМ), управлять диаграммой направленности и производить электронное сканирование пространства приемопередающей антенны. Применение АФАР для создания сканирующих антенн позволяет реализовать высокую скорость обзора пространства и способствует увеличению получаемой информации о распределении источников излучения или отражения [1].

Одним из самых важных факторов производства является обеспечение контроля выходных



3(530).indd 71 04.10.2016 14:50:02

параметров выпускаемых ППМ. Важным инструментом контроля выходных параметров ППМ помимо радиоизмерительных приборов являются измерительные оправки. Безусловно, в настоящее время разработка измерительных оправок является одной из ключевых задач, т. к. именно измерительная оправка, выполненная с высокой точностью, может обеспечить достоверность выходных измеряемых параметров ППМ.

## 2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ППМ «Аббат-И»

ППМ «Аббат-И» используется для обработки сигнала в АФАР. Модуль имеет два возможных режима работы: на прием и на передачу. Соответственно в ППМ «Аббат-И» имеются приемный канал (имеющий разделение на два выхода) и передающий канал. Разделение между каналами осуществляется циркулятором, а выбор выхода для приемного канала обеспечивается режимами коммутатора [2, 3].

Приемный канал включает: защитное устройство (ЗУ) [4]; малошумящий усилитель (МШУ) [4]; согласующий усилитель (СУ); многофункциональную (МФ) МИС СВЧ «Core-chip» [5]; СВЧ-переключатели [3].

В состав передающего канала входят: СВЧ-переключатели; МФ МИС СВЧ «Core-chip» [4]; предварительный усилитель мощности (ПУМ); выходной усилитель мощности (ВУМ).

Модуль также имеет низкочастотную (НЧ) часть для управления МФ МИС СВЧ «Core-chip» и для обеспечения питания ПУМ, ВУМ, МШУ, СУ, коммутатора.

При рассмотрении различных вариантов структурной схемы ППМ «Аббат-И» основными критериями для выбора являлись минимальное энергопотребление, минимальные массогабаритные параметры, возможность применения унифицированных узлов, максимальное использование МИС, разрабатываемых АО «НПП «Исток» им. Шокина» или другими российскими предприятиями. При этом должно быть обеспечено безусловное выполнение технических требований ТЗ и надежности ППМ. Разработанная структурная схема ППМ «Аббат-И» приведена на рис. 1 [2, 3].

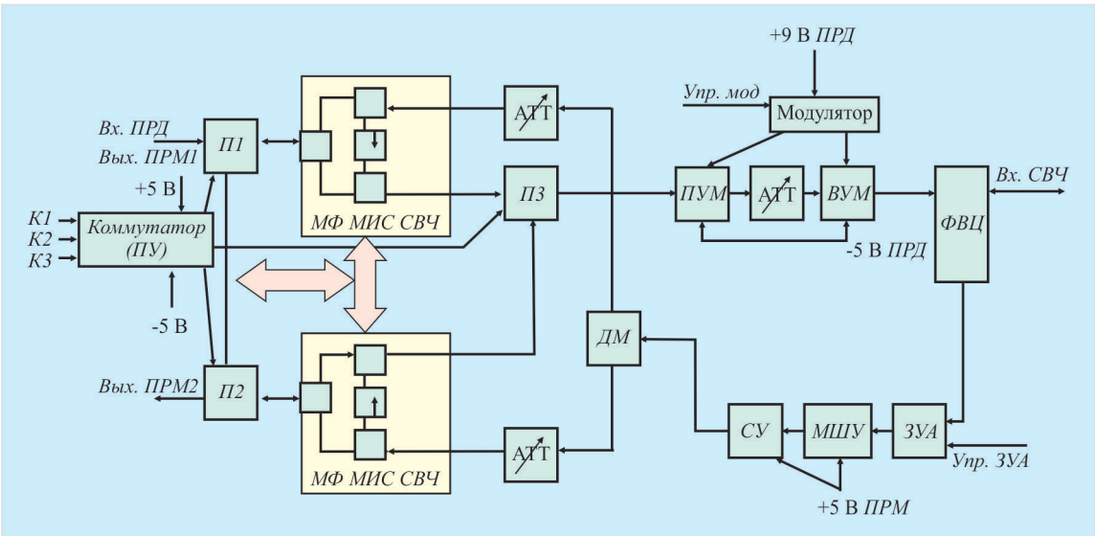



Рис. 1. Структурная схема ППМ «Аббат-И»



3(530).indd 72 04.10.2016 14:50:03

Применение МФ МИС СВЧ «Core-chip» в составе модуля позволяет уменьшить трудоемкость, стоимость, а также увеличить надежность производимого изделия.

Установка такой МФ МИС СВЧ в состав модуля выводит разработанный модуль на уровень лучших зарубежных аналогов.

Вид ППМ «Аббат-И» в сборе представлен на рис. 2.

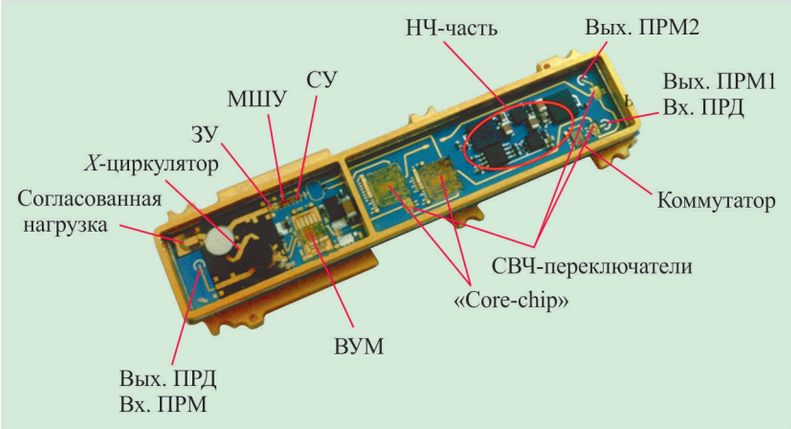



Рис. 2. ППМ «Аббат-И» в сборе

Все составные элементы модуля располагаются на LTCC многослойной керамической плате.

Многослойность LTCC позволяет производить требуемую разводку микрополосковых линий как ВЧ-, так и НЧ-сигнала. За счет выполнения специальных переходных отверстий можно произвести разводку проводников между слоями LTCC и тем самым обеспечить значительную экономию пространства внутри ППМ.

В этой работе выбор использования LTCC-керамики был обоснован идеей поверхностно-контактного соединения модулей с устройством, в котором в дальнейшем будут использованы ППМ.

## 3. ПОВЕРХНОСТНОЕ КОНТАКТНОЕ СОЕДИНЕНИЕ МОДУЛЕЙ И КОАКСИАЛЬНЫЙ LTCC-ПЕРЕХОД

Поверхностное контактное соединение модулей (ПКСМ) – способ соединения, основанный на прижатии через специальный соединитель выходного СВЧ-контакта модуля к поверхности, на которой размещаются ППМ для дальнейшей работы. ПКСМ показано на рис. 3.

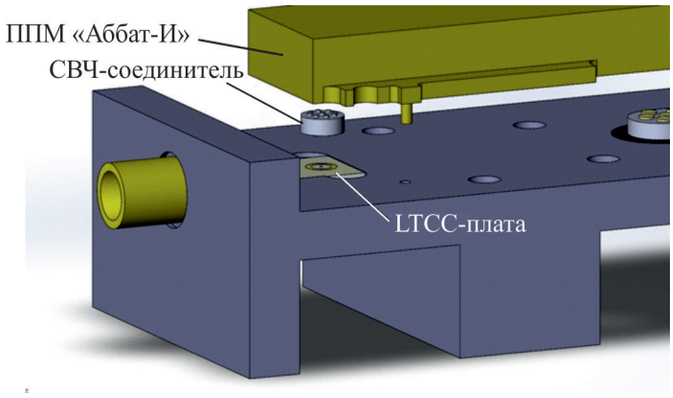



Рис. 3. Поверхностное контактное соединение модулей



3(530).indd 73 04.10.2016 14:50:03

Так как особенности LTCC-технологии позволяют при помощи переходных отверстий переходить из слоя в слой, то выводы контактов СВЧ и НЧ можно вывести на нижний поверхностный слой и выполнить их в виде круглых площадок для дальнейшего контактирования. На рис. 4 изображены контактные площадки, выведенные на нижний поверхностный слой LTCC-керамики.

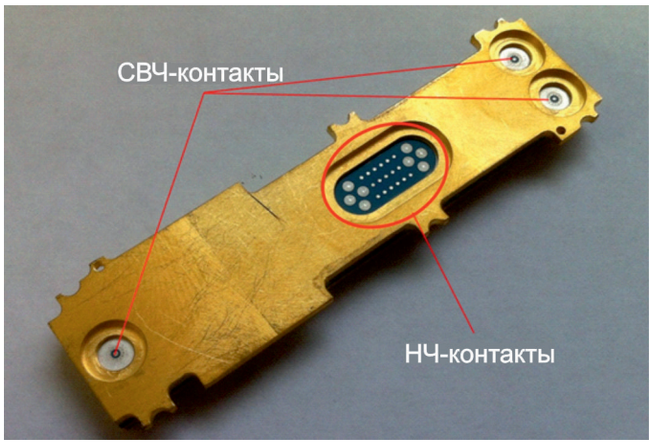



Рис. 4. Контактные площадки,
выведенные на нижний поверхностный слой LTCC-керамики модуля

Применение таких поверхностных контактных площадок делает возможным соединение модуля с поверхностью для передачи СВЧ-энергии через контактный соединитель. Данный способ обеспечивает минимизацию нежелательных СВЧ-потерь, связанных с соединением модулей кабелями, различными СВЧ-переходами и недостатками сборки.

Структура СВЧ-перехода из LTCC-керамики выполняется при помощи земляных металлизированных отверстий, проходящих насквозь до нижнего поверхностного слоя LTCC, образуя тем самым как бы коаксиальную структуру, в середине которой по переходному отверстию проходит СВЧ-энергия с верхнего слоя LTCC на нижний. Расстояние между переходным СВЧ-отверстием и создающими коаксиальную структуру земляными отверстиями рассчитывается так же, как и для коаксиального кабеля.

Но так как LTCC-керамика расположена на необходимом металлическом основании, которое обеспечивает хороший теплоотвод от мощных чипов СВЧ (ПУМ, ВУМ), для передачи СВЧ-энергии требуется контактный СВЧ-соединитель, который имел бы низкие потери СВЧ-энергии, плотное соединение с нижней частью платы LTCC и долгий срок службы при многократном использовании его в лабораторных условиях на измерительных оправках. Такой же специальный соединитель требуется и в НЧ-части модуля, чтобы обеспечить управление основными узлами и запитки элементов.

## 4. СВЧ- И НЧ-СОЕДИНИТЕЛИ

В настоящее время по заказу НИИП им. В. В. Тихомирова в ОАО «Карачевский завод «Электродеталь» разработан СВЧ-соединитель, который полностью удовлетворяет требованиям для использования его в составе ППМ «Аббат-И». Вид миниатюрного СВЧ-соединителя приведен на рис. 5.



3(530).indd 74 04.10.2016 14:50:03

Рис. 5. СВЧ-соединитель,
разработанный по заказу НИИП им. В. В. Тихомирова

**Основные параметры СВЧ-соединителя**

Диапазон рабочих частот, ГГц……...до 20
Волновое сопротивление, Ом……..…...…50
Предельная импульсная мощность, Вт..…...…15
Потери СВЧ-энергии, дБ…….0,2

На рис. 6 приведен НЧ-соединитель для обеспечения питания и управления узлов.

Рис. 6. НЧ-соединитель,
разработанный по заказу НИИП им. В. В. Тихомирова

Данные СВЧ- и НЧ-соединители вкладываются в специально сделанную выборку в основании модуля и фиксируются резиновым уплотнителем, который позволяет обеспечить надежную фиксацию соединителя внутри выборки.



3(530).indd 75 04.10.2016 14:50:03

Далее приемопередающие модули устанавливаются на специальную плиту, где имеются такие же поверхностные СВЧ- и НЧ-контакты. Прижатие и фиксация модулей обеспечивают надежную передачу СВЧ-энергии.

## 5. ОПРАВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ППМ «Аббат-И»

Одним из самых важных факторов производства является обеспечение контроля выходных параметров выпускаемых ППМ.

Основным инструментом для измерения выходных параметров является измерительная оправка.

Измерительная оправка для ППМ «Аббат-И» должна обладать следующими основными характеристиками: контактным соединением с модулем; малыми СВЧ-потерями; долгим сроком службы при частом использовании.

Для контроля выходных параметров ППМ «Аббат-И» была разработана измерительная оправка, изображенная на рис. 7.

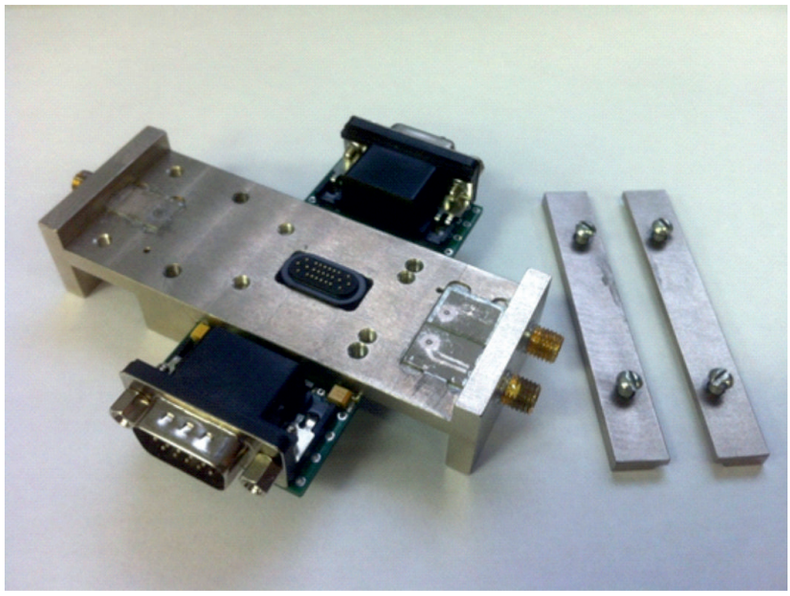


Рис. 7. Вид измерительной оправки в сборе

Особенностью данной оправки являются СВЧ LTCC-платы, впаянные в выборку, что обеспечивает надежное и прочное соединение этих плат с основанием. Платы из LTCC-керамики имеют высокую точность изготовления, долгий срок службы, необходимую прочность и низкие СВЧ-потери.

Схемотехническое изображение LTCC-плат для измерительной оправки приведено на рис. 8.

При ПКСМ с LTCC-платами в измерительной оправке и СВЧ-соединителем происходит передача СВЧ-энергии с верхнего слоя платы через переходное отверстие на нижний слой. На нижнем слое имеется копланарная линия передачи, которая передает поступающую СВЧ-энергию на впаянный в стенку основания измерительной оправки переход КРПГ.434511.015 [6].



3(530).indd 76 04.10.2016 14:50:03

Соединение копланарной линии на нижнем слое LTCC-платы с переходом КРПГ.434511.015 обеспечивается припоем ПОИн-50, а впаивание перехода КРПГ.434511.015 в стенку основания – припоем ПОС-61.

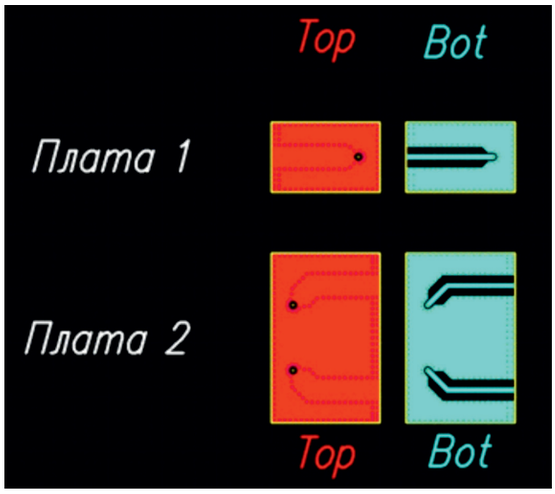



Рис. 8. Схемотехническое изображение LTCC-плат для измерительной оправки

Для обеспечения подачи питания и управления основными узлами ППМ «Аббат-И» была разработана плата, которая в своем составе также имеет контактные площадки для ПКСМ. Разработанная плата питания и управления изображена на рис. 9.

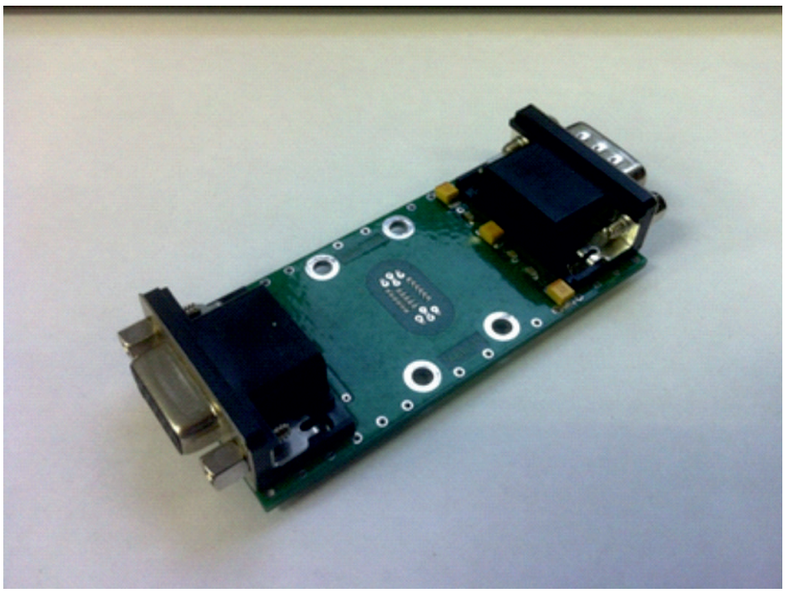


Рис. 9. Разработанная плата питания и управления

При помощи ПКСМ через НЧ-соединитель и НЧ контактными площадками на плате питания и управления производится запитка основных узлов и управление модулем.

Модуль устанавливается на измерительную оправку посредством вставки направляющих штырей, выполненных на дне модуля, в специальные направляющие отверстия и прижимается



3(530).indd 77 04.10.2016 14:50:04

пластинами, обеспечивая при этом точное совпадение центров контактных площадок СВЧ-соединителя и LTCC-плат.

Самым важным и приоритетным параметром при изготовлении измерительной оправки и входящих в ее состав элементов является точность изготовления, т. к. малейшая несовместимость при ПКСМ приведет к сильным потерям СВЧ-энергии.

Чтобы измерить вносимые измерительной оправкой СВЧ-потери, была разработана специальная «ответная часть для измерения потерь».

Ответная часть для измерения потерь изображена на рис. 10, а экспериментальные данные измерения потерь в оправке – на рис. 11.

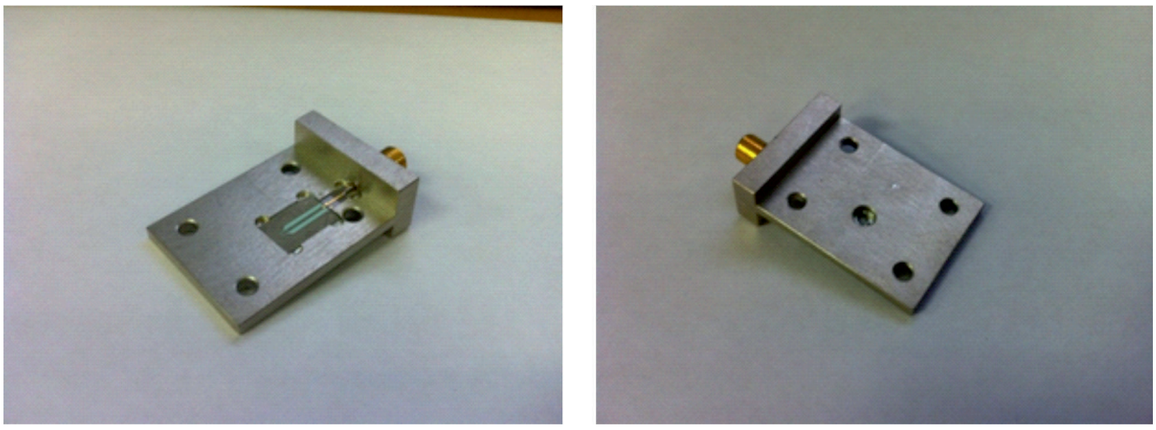


Рис. 10. Разработанная ответная часть для измерения потерь

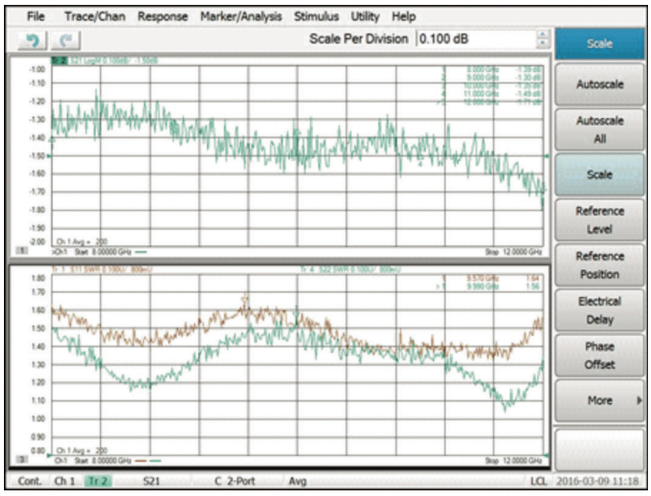



Рис. 11. Экспериментальные данные измерения потерь в оправке

Результаты экспериментальной проверки, приведенные на рис. 11, сведены в таблицу.

| $F$, ГГц | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|
| $S_{21}$ (потери), дБ | -1,39 | –1,30 | –1,35 | –1,49 | –1,71 |
| Максимальный КСВН:<br>входа<br>выхода | 1,64 (9,5 ГГц)<br>1,56 (10 ГГц) | | | | |



3(530).indd 78 04.10.2016 14:50:04

Из результатов экспериментальной проверки следует, что данная измерительная оправка требует некоторой доработки. Она имеет недостатки, связанные со стиранием металлизации и деформацией переходных LTCC-плат, а также требуется повышенная точность изготовления всех входящих в измерительную оправку элементов. Для того чтобы устранить данные недостатки, было принято решение разработать новую измерительную оправку для ППМ «Аббат-И».

## 6. РАЗРАБОТКА НОВОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОПРАВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ППМ АФАР

На основе разработанной ранее оправки для ППМ «Аббат-И» в настоящее время ведется разработка новой измерительной оправки (НИО), детали которой изображены на рис. 12.

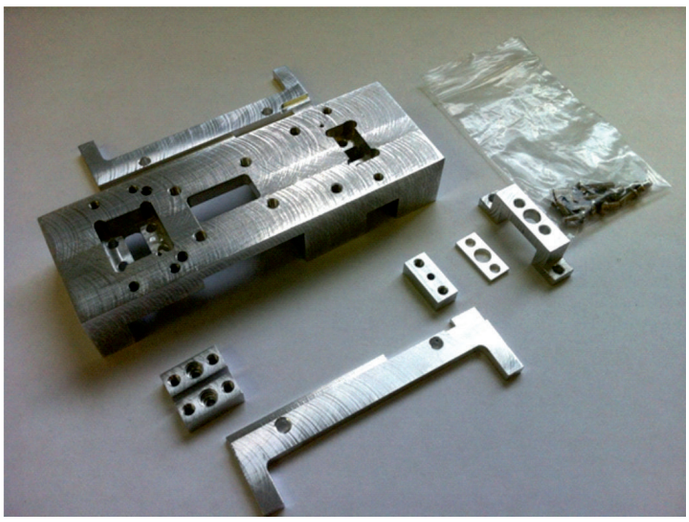


Рис. 12. Детали новой измерительной оправки

Главным достоинством НИО является возможность ее аттестации. С помощью элементов, используемых в НИО, можно собрать конструкцию для измерения потерь в НИО (рис. 13).

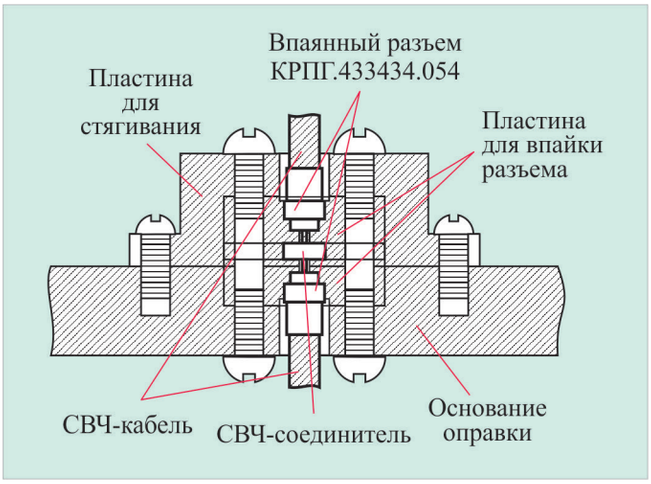



Рис. 13. Конструкция для измерения потерь в НИО



3(530).indd 79 04.10.2016 14:50:04

Два разъема КРПГ.433434.054 связывает СВЧ-соединитель, именно он передает СВЧ-энергию из разъема в разъем, что имитирует соединение ППМ «Аббат-И» и пластины с впаянным разъемом КРПГ.433434.054 [6].

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образов, в ходе работы выполнено следующее:

1. Обследованы СВЧ- и НЧ-соединители, которые позволили сделать возможной разработку ППМ «Аббат-И».

2. Разработана измерительная оправка для измерения выходных характеристик ППМ «Аббат-И», имеющая поверхностное контактное соединение с модулем.

3. В процессе работы над измерительной оправкой выявлены некоторые недостатки конструкции, что в дальнейшем привело к разработке новой оправки, имеющей:

– удобство установки модуля в оправку;
– возможность аттестации;
– возможность замены элементов оправки при эксплуатации;
– универсальность (измерение и других модулей АФАР, обладающих ПКСМ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Джуринский, К. Б.** Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / К. Б. Джуринский. – Санкт-Петербург: Издательство ЗАО «Медиа Группа Файнстрит», 2014. – 428 с.

2. **Воскресенский, Д. И.** Активные фазированные антенные решетки / Д. И. Воскресенский, А. И. Канащенков. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.

3. **Темнов, А. М.** Комплекс широкополосных СВЧ-микросхем на гетероструктурах $A^{III}B^{V}$ для ППМ АФАР *X*-диапазона / А. М. Темнов, К. В. Дудинов, В. А. Красник, Ю. М. Богданов, А. В. Крутов, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 2(505). – С. 30 – 49.

4. **Щербаков, Ф. Е.** Многофункциональная МИС с малым энергопотреблением на основе 2-уровневых pHEMT для перспективных модулей АФАР / Ф. Е. Щербаков, Ю. М. Богданов, К. В. Дудинов, В. Е. Земляков, В. А. Красник, В. Г. Лапин, К. И. Петров // интернет источник: http://mwelectronics.ru/2012/Oral/U13_F.E.%20 Scherbakov_Mnogofunktsional'naya%20MIS%20.pdf.

5. **Темнов, А. М.** Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2*D*- и 3*D*-модулей АФАР *X*-диапазона / А. М. Темнов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1(520). – С. 45 – 53.

6. **Темнов, А. М.** Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2*D*- и 3*D*-модулей АФАР *X*-диапазона. Часть 2 / А. М. Темнов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 2(521). – С. 23 – 32.

*Статья поступила 22 марта 2016 г.*



3(530).indd 80 04.10.2016 14:50:04

УДК 621.372.543.2

# ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ СУММАТОР МОЩНОСТИ В *X*-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

**С. В. Гармаш, А. А. Кищинский**

*АО «Микроволновые системы», г. Москва*

**В. М. Геворкян, Ю. А. Казанцев**

*НИУ «МЭИ», г. Москва*

**Представлены результаты проектирования сумматора мощности сигналов волноводных трактов, обладающего развязкой -15 дБ между подводящими каналами при вносимых потерях менее 0,3 дБ в полосе частот 8,15…10,35 ГГц. Особенность проектируемого устройства заключается в ограничении его поперечных размеров.**

*КС: сумматор мощности, волноводный тракт, развязка между каналами, ограниченные размеры*

# TWO-CHANNEL WAVEGUIDE POWER COMBINER IN *X*-BAND WAVELENGTHS

**S. V. Garmash, A. A. Kishchinsky**

*JSC «Microwave Systems», Moscow*

**V. M. Gevorkyan, U. A. Kazantsev**

*SRU «MEI», Moscow*

**The results of designing waveguides power combiner with decoupling about -15 dB between input channels at less than 0.3 dB insertion loss within 8.15…10.35 GHz frequency range have been presented. The peculiarity of the device being designed is its transverse size limitation.**

*Keywords: power combiner, waveguides, channels decoupling, transverse size limitations*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Представлены результаты проектирования компактного двухканального сумматора мощности, обеспечивающего развязку подводящих волноводных каналов. Наиболее просто реализуется сумматор синхронных сигналов, содержащий два тождественных согласованных канала и их светвитель (рис. 1). Сигналы, образованные волнами в каналах, в светвителе дифрагируют. При этом от каждого канала в светвитель поступает половина мощности, четверть поступает в соседний канал, а другая четверть отражается обратно. При одновременном поступлении в каналы синфазных сигналов, в канале светвления сигналы складываются (они поступают в фазе). В подводящих волноводах обратные (направленные к их входам) волны вычитаются (складываются в противофазе). В канале светвления возникает мощность, равная сумме мощностей источников в каналах. Таким образом, при наличии синфазных сигналов в обоих подводящих каналах, каналы абсолютно развязаны. Однако при отсутствии сигнала в одном из



3(530).indd 81 04.10.2016 14:50:04

каналов (или возникновении их несинфазности или отличия в амплитудах) развязка каналов уменьшается, достигая в пределе -6 дБ. При этом коэффициент передачи сигнала в канале светвления (на выходе сумматора мощности) уменьшается в 4 раза (до -6 дБ). Это объясняется тем, что половина сигнала распределяется пополам между соседним каналом и отраженной волной. КСВН во входном канале возрастает до 3 (коэффициент отражения возрастает до -6 дБ).

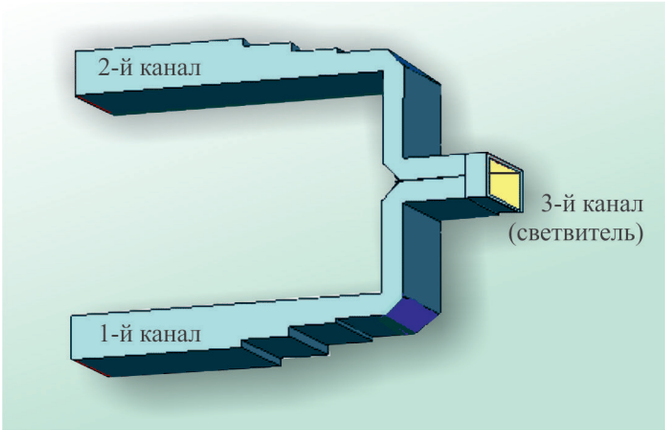



Рис. 1. Сумматор синфазных сигналов

При различии сигналов в подводящих линиях развязку каналов сумматора можно обеспечить на основе «двойного Т-моста» [1]. Однако такая конструкция сумматора реализуется только при ортогональных направлениях волноводных труб и большой длине одного из волноводов, соответствующего нескольким длинам волны. Компактные сумматоры с развязкой каналов можно реализовать с применением гибридного кольца. Тем не менее гибридное кольцо просто формируется на основе двусвязных направляющих линий, которые легко сочленяются с сосредоточенными резистивными включениями.

В высокочастотной области, а также при суммировании мощностей высокого уровня в качестве волноведущих структур обычно применяются полые волноводы, однако формирование сосредоточенных резистивных включений в них неочевидно. Один из возможных вариантов – формирование резистивных включений в виде поглощающих плёнок в волноводе светвления [2] (рис. 2). В представленном в [2] варианте построения сумматора для диапазона частот 31…35 ГГц поглощающие пленки с сопротивлением 120 Ом/□ размещены на поверхностях тонкой диэлектрической пластины из поликора. Это обеспечило передачу сигналов во всем диапазоне частот из каждого канала в волновод светвления с различием не более 0,2 дБ при развязке между подводящими трактами порядка 20 дБ, с потерями суммирования при синфазных сигналах в подводящих трактах менее 0,5 дБ, а также с близким к единице КСВН (отражением меньше 30 дБ) на входах всех волноводов.

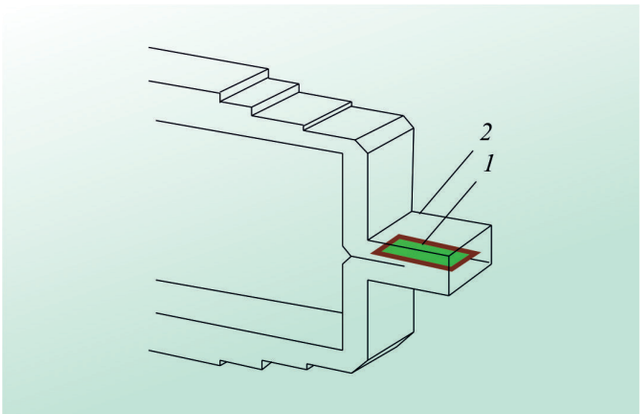



Рис. 2. Контурное изображение модели волноводного тракта сумматора мощности с поглощающей вставкой (*1*) на диэлектрической пластине в центральной плоскости волновода светвления (*2*)



3(530).indd 82 04.10.2016 14:50:04

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Учитывая результаты создания волноводных сумматоров, в качестве основы разрабатываемого сумматора была принята конструкция, построенная на прямоугольных волноводах с волной низшего типа, аналогичная рис. 2.

Процесс проектирования сумматора с требуемыми параметрами состоит из трех этапов.

На первом этапе с помощью математической модели формируем систему симметричных каналов с переходами от волноводов со стандартными сечениями 23×10 мм на волноводы сечением 23×5 мм, причем каждый из трактов с сечением 23×5 мм имеет два изгиба на 90° в *E*-плоскости прямоугольного волновода, аналогично рис. 1, а также волновод светвления (3-й канал) сечением 23×10 мм. Процесс заключается в выборе числа и глубины ступеней волно-водно-волноводного перехода, а также в формировании зеркальных стенок уголковых поворотов, удовлетворяющих следующему комплексу требований: передача из каждого канала в волновод светвления соответствует $S_{13} = S_{23} = -6$ дБ, КСВН каналов 1 и 2 соответствует $S_{11} = S_{22} = -6$ дБ, а $S_{33}$ равен не более -20 дБ. Результат первого этапа иллюстрирует рис. 3.

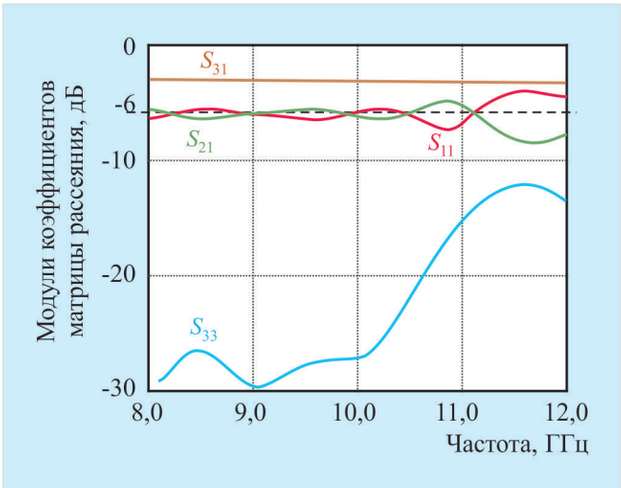



Рис. 3. Параметры модели волноводного сумматора мощности каналов 1 и 2 без поглощающей вставки в центральной плоскости в волноводе светвителя – 3-й канал

Полученные *S*-параметры реализуют сумматор синфазных сигналов, содержащий два тождественных согласованных входных канала и их светвитель. Это нельзя увидеть, анализируя *S*-параметры самого сумматора, но это следует из результатов расчета передачи сигнала в системе делитель/сумматор (рис. 4). В такой системе суммирование осуществляется без потерь (рис. 5), что указывает на практически абсолютную развязку входных волноводов. Тем не менее, при нарушении синфазности и (или) равенства амплитуд волн во входных каналах, возникают потери при передаче мощности (уменьшается развязка между входными каналами).

На втором этапе решается задача развязки входных волноводных трактов с помощью введения поглотителя в область их светвления. Решение достигается в процессе синтеза на основе регрессионного анализа математической модели. На рис. 6 показан вариант развязки между входными каналами, а на рис. 7 изображена соответствующая ему передача сигнала из одного из входных волноводов в выходной волновод (светвитель). Заметим, что входные каналы иден-



3(530).indd 83 04.10.2016 14:50:04

тичны относительно волновода светвителя, а шестиполюсник сумматора – система взаимная. Соответствующий этим характеристикам коэффициент передачи сигнала в сумматоре представлен на рис. 8, из которого видно, что в волноводе светвителя мощность удваивается.

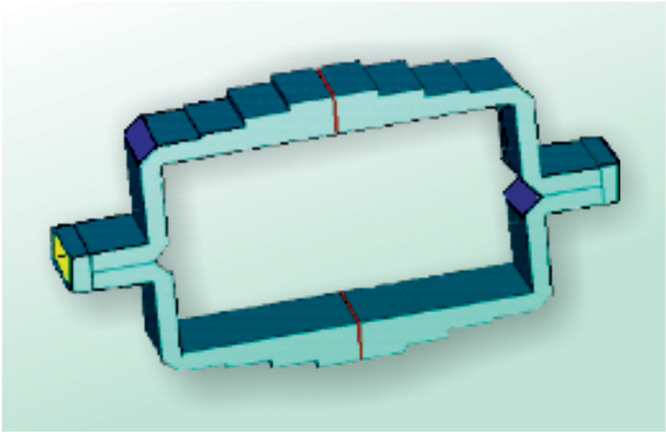


Рис. 4. Система делитель/сумматор для расчета *S*-параметров

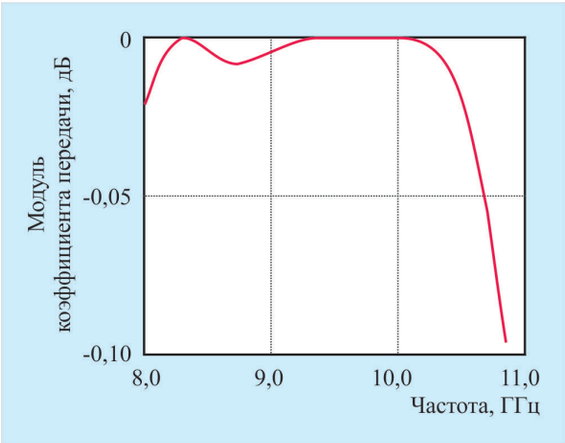



Рис. 5. Передача мощности в системе делитель/сумматор

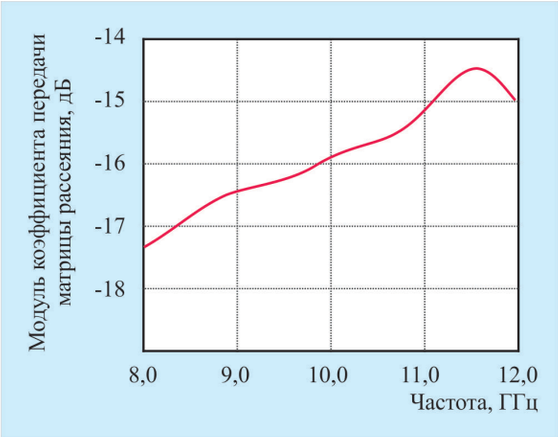



Рис. 6. Частотная характеристика развязки входных каналов

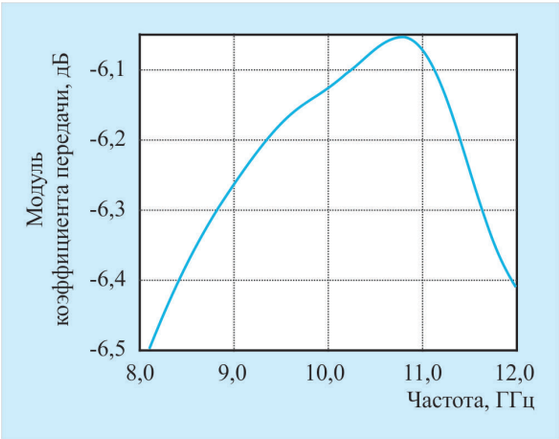



Рис. 7. Частотная характеристика коэффициента передачи сигнала из входных каналов (1 или 2) в волновод светвителя (3)



3(530).indd 84 04.10.2016 14:50:05

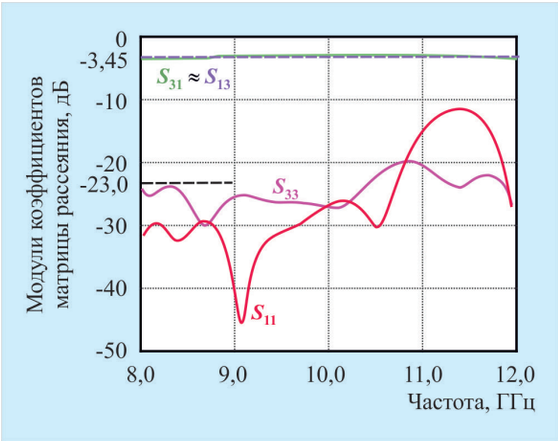



Рис. 8. Частотные характеристики сумматора с развязкой входных каналов

Из полученных кривых видно, что в выходном канале синфазные сигналы складываются.

Из анализа полученных частотных характеристик следует алгоритм сложения сигналов при обеспечении развязки каналов. Суть алгоритма в том, чтобы минимизировать потери передачи сигналов из входных каналов в выходной волновод при сохранении развязки между входными каналами. Наименьшее значение потерь передачи сигнала из каждого входного канала в волновод светвления составляет 3 дБ. Расчеты показывают, что развязку каналов удаётся достичь гораздо проще, чем обеспечить малые потери в канале суммирования.

В результате поиска удовлетворительного решения задачи получены параметры каналов сумматора, приведенные на рис. 9, и параметры сумматора, представленные на рис. 10. Последние получены с применением системы синфазный делитель (без развязывающей пластины) и развязанный по входам сумматор.

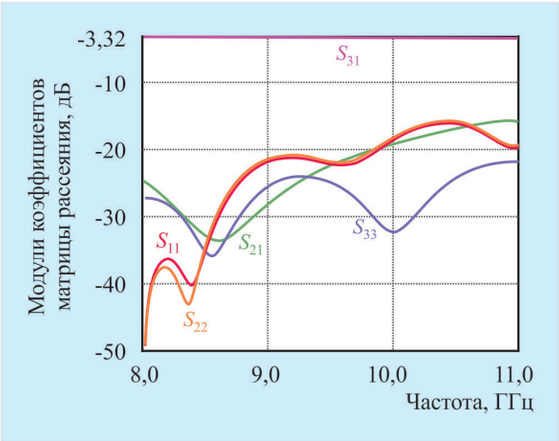



Рис. 9. Частотные характеристики каналов сумматора мощности

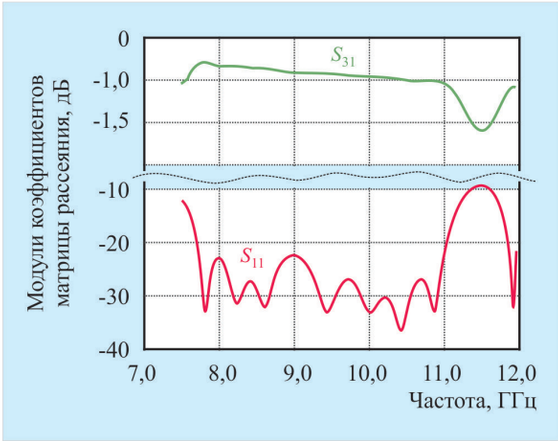



Рис.10. Частотные характеристики (коэффициенты матрицы рассеяния) сумматора

Замечено, что с уменьшением различия в коэффициентах передачи между входными каналами и выходным волноводом, а также с уменьшением потерь в этих коэффициентах передачи потери в выходном канале при синфазных входных сигналах уменьшаются.



3(530).indd 85 04.10.2016 14:50:05

В соответствии с этим, на третьем этапе в процессе уточнения одинаковости входных волноводных каналов решается задача минимизации потерь передачи синфазных сигналов при сохранении их развязки.

Процесс минимизации потерь при суммировании синфазных сигналов сводится к малой коррекции геометрических размеров и проводимости поглощающих пленок на диэлектрической вставке в светвителе (см. рис. 2). На рис. 11 представлены итоговые характеристики модели сумматора мощности, соответствующие сложению синфазных сигналов во входных каналах, а на рис. 12 приведены характеристики каналов, обеспечивших параметры сумматора.

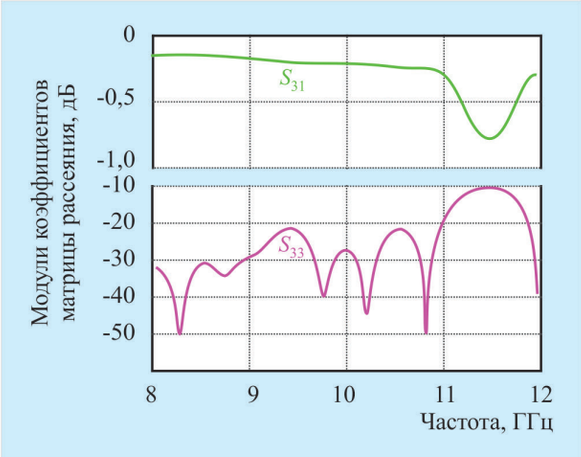



Рис.11. Характеристики модели сумматора мощности

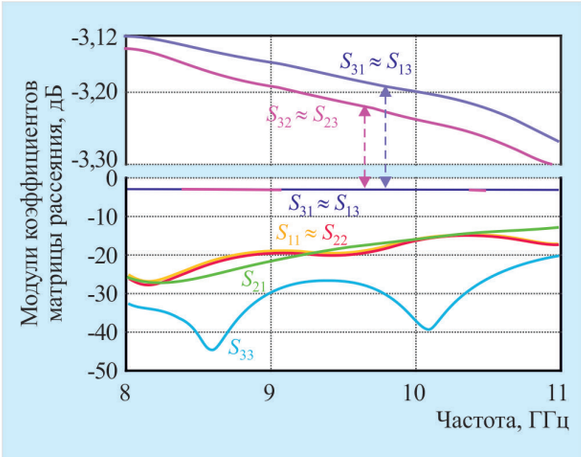



Рис.12. Характеристики каналов модели сумматора мощности

Экспериментальная проверка полученных расчетных данных проведена на основе действующего макета с геометрическими размерами математической модели.

На рис. 13 приведены экспериментальные зависимости развязки каналов двухканального волноводного сумматора мощности и частотные зависимости коэффициентов стоячей волны на

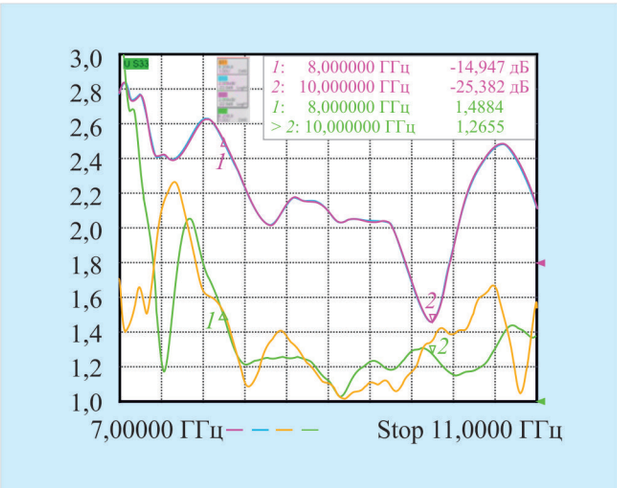



Рис.13. Экспериментальная характеристика развязки каналов модели двухканального сумматора мощности



3(530).indd 86 04.10.2016 14:50:05

входах каналов. Сравнение расчетных и экспериментальных кривых указывает на удовлетворительное для инженерной практики соответствие уровней развязки каналов при противоположном характере поведения зависимости $S_{21}$. Кроме того, экспериментальные зависимости КСВН отличаются частотной неравномерностью и бóльшими значениями, что связано с технологическими отличиями выполнения согласующих ступеней каналов относительно расчетных значений и отличиями присоединителей. Интересно отметить, что при организации режима холостого хода на одном из каналов режим в другом канале практически не меняется.

Итак, проведенные исследования указывают на перспективность создания сумматоров/делителей мощности рассмотренного типа.

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ подтвердил возможность проектирования компактного волноводного сумматора мощности сигналов, обладающего развязкой -15 дБ между подводящими каналами при вносимых потерях менее 0,3 дБ в полосе частот 8,15…10,35 ГГц. Однако такие характеристики реализуются в варианте суммирования синфазных сигналов, а при нарушении этого условия возрастают потери, сопровождающие сложение сигналов. При отсутствии сигнала в одном из каналов выходная мощность уменьшается в 4 раза относительно номинального режима. Основным достоинством сумматора с развязкой каналов является сохранение развязки и в случае нарушения синфазности сигналов во входных каналах.

Полученные размеры согласующих ступеней и резистивных вставок двухканального сумматора позволяют создать сумматоры каналов кратные 2 за счет простого дублирования волноводных трактов.

Учитывая взаимность устройства, очевидно, оно может служить делителем мощности сигналов.

С применением предложенного алгоритма можно осуществить проектирование аналогичных устройств в соседних частотных областях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Фельдштейн, А. Л.** Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич, В. П. Смирнов. – М.: Советское радио, 1967. – 652 с.

2. **Epp, Larry W.** A high-power *Ka*-band (31…36 GHz) solid-state amplifier based on low-loss corporate waveguide combining / Larry W. Epp, Daniel J. Hoppe, Abdur R. Khan, Scot L. Stride // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – August 2008. – Vol. 56, No. 8.

*Статья поступила 6 мая 2016 г.*



3(530).indd 87 04.10.2016 14:50:05

УДК 629.7, 681.2

# СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Н. С. Данилин, И. Ю. Булаев**

*АО «Российские космические системы», г. Москва*

**Рассмотрен вариант обобщённой архитектуры автономной системы обнаружения и устранения нештатных ситуаций на борту космических аппаратов, построенной на основе НЧ- и СВЧ-компонентов.**

*КС: автономная система обнаружения и устранения нештатных ситуаций, надежность, космический аппарат, аппаратно-программная среда*

# THE SYSTEM OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON BOARD THE SPACE VEHICLES

**N. S. Danilin, I. U. Bulayev**

*JSC «Russian Space Systems», Moscow*

**The version of generalized architecture of autonomous system built on the basis of low-frequency and microwave components for localization and elimination of contingencies on board the space vehicles has been considered.**

*Keywords: autonomous system for localization and elimination of contingencies, reliability, space vehicle, hardware-software medium*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы надежности электронной компонентной базы (ЭКБ) на основе НЧ- и СВЧ-компонентов для космических аппаратов давно находятся в самом центре внимания инженерного космического сообщества и руководства отрасли на всех ее уровнях [1]. На головных фирмах организованы соответствующие структуры, включая специалистов по надежности ЭКБ, испытательные центры, сертификационные органы и др. Помимо того, большое внимание этому вопросу уделено со стороны Роскосмоса, МО РФ и ряда федеральных целевых программ в области микроэлектроники и приборостроения. Тем не менее несколько отечественных миссий только в последнее время претерпели существенные неудачи. Одним из главных вопросов, возникающих при этом, является определение области поиска причин для такого рода проблем – то ли они связаны с неэффективностью систем контроля качества и надежности ЭКБ и комплектующих изделий, то ли это пресловутый «человеческий фактор» при реализации проекта или, может быть, проблемы в другом?

Подход к ответу на этот вопрос дают анализы, проведенные в NASA (JPL, Ames Research Center, Goddard Space Flight Center) после провала нескольких американских миссий – Geneis, Columbia, Mars Polar Lander, Mars Climate Orbiter, Mars Observer и др. Было выявлено, что, даже при близкой к 100 % надежности ЭКБ и комплектующих изделий, вместе с полным исключением влияния «человеческого фактора» при реализации проекта, вероятность возникновения не-



3(530).indd 88 04.10.2016 14:50:05

штатной ситуации на борту космического аппарата со сроком активного существования (САС) более 7 лет превышает 20 %. С учетом факторов воздействия космического пространства, указанный риск может достигнуть в отдельных случаях и 30…40 %. Это означает, что существует необходимость обнаружения нештатных ситуаций на борту в режиме реального времени с последующим устранением их возможных последствий с помощью соответствующей организации аппаратно-программной среды. В этом и заключается суть реализации бортовой автономной системы обнаружения и устранения нештатных ситуаций (АСОУНС). Впервые такая система была запущена на спутнике EO-1 (Earth Observing One, входящий в программу New Millenium Program) в 2003 г. под названием L2 (Livingstone 2). L2 базировалась на ситуационной диагностической модели, работающей в целевой аппаратно-программной среде [2].

Задача настоящей работы – предложить вариант обобщённой архитектуры АСОУНС для автоматических космических аппаратов с САС более 7 лет.

## 2. О ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ L2 (LIVINGSTONE 2) И ЕЕ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

L2 является дискретной моделью, которая использует базу знаний о программно-аппаратной среде и сценариях функционирования космического аппарата и принимает диагностические и коррекционные решения по предварительно заданным сценарным правилам. Модель состоит из двух базовых структурных компонентов: базы знаний со специфической для конкретного спутника диагностической информацией и компонентно-ориентированного описания аппаратной среды с разной степенью детализации и связностью [3]. Каждый компонент базы данных в своем описании может содержать вложенные компоненты более низкого иерархического уровня. Из-за дискретного характера модели ее переменные могут принимать конечные множества значений качественных характеристик описания ситуаций, например: «низкое значение», «высокое значение», «допустимое значение» и т. п., а ее структурные компоненты могут находиться в нескольких состояниях – «включено», «выключено», «возник сбой», «сбой устранен» и т. д. Каждое текущее состояние борта в дискретном реальном моменте времени определяется в терминах телеметрической информации и сравнивается со своим «идеальным образом», который заложен в базе знаний L2. При возникновении несоответствия (в проектно-определенных рамках) инициируется режим выявления нештатной ситуации с последующим ее устранением и посылкой соответствующей телеметрической информации. L2 прогнозирует текущее состояние борта к моменту поступления его реального телеметрического изображения [4]. В самом общем виде L2 функционирует в каждом дискретном моменте времени как последовательность нескольких процедур: синтез телеметрического образа бортовой ситуации с параллельной генерацией прогнозного состояния, выработка адекватной ситуационной модели на их базе и ее последующее тестирование с целью выявления несоответствий и принятия решений по устранению нештатной ситуации. Важно отметить, что L2 может проводить диагностирование как аппаратуры спутника, так и его программного обеспечения. Обобщенная структурная схема АСОУНС L2 представлена на рис. 1.

Аппаратная реализация L2 для спутника EO-1 была выполнена в виде автономного модуля WARP (Wideband Advanced Recorder Processor) с применением радиационно стойкого (накопленная доза 100 Крад и ЛЭТ 80 МэВ·см2/мг) 32-разрядного микропроцессора Mongoose 5 со встроенными плавающей запятой, EDAC, контроллером для управления внешней памятью,



3(530).indd 89 04.10.2016 14:50:05

2-Кб кэш-памятью для данных, 4-Кб кэш-памятью для команд, в металлокерамическом корпусе с 256 выводами и с тактовой частотой 25 МГц.

Рис.1. Обобщенная структурная схема АСОУНС L2

### 3. ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ АСОУНС НА БАЗЕ L2 И МИКРОПРОЦЕССОРА LEON 3 FT (UT699E)

В основе предлагаемого технического решения для АСОУНС заложен радиационно стойкий компьютерный модуль формата PC 104, известный как «Aeroflex Lego» и разработанный в 2011 г. для нужд космического приборостроения [5]. Механическая конструкция модуля на 5 посадочных местах и возможности его питания (мощностью до 40 Вт) позволяют реализовать двухпроцессорную систему на основе нового микропроцессора серии Leon 3FT UT 700 (с тактовой частотой 166 МГц и производительностью 1,2 DMIPS/МГЦ), что соответствует необходимости автономной реализации для блока экспертной системы L2 и для генератора сценариев. Архитектура варианта АСОУНС на UT 700 в составе процессорного модуля и модуля ввода/вывода показана на рис. 2 и 3.

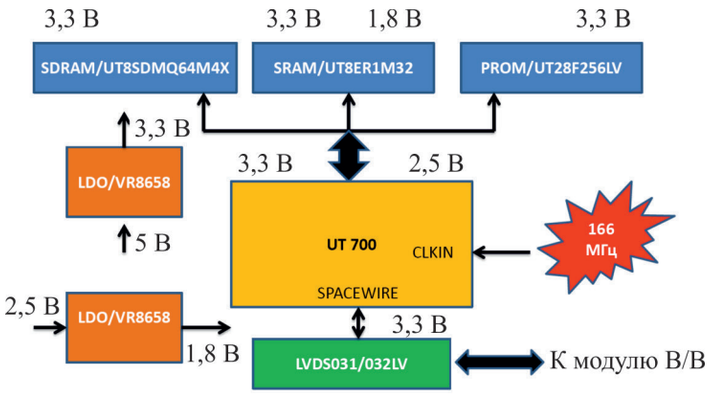



Рис. 2. Вариант процессорного модуля АСОУНС

Действующий макет АСОУНС в своем первом варианте предусматривает диагностику и устранение нештатных ситуаций для платформ отечественных спутников. Так как проект рассчитан на заимствование и применение некоторых достаточно формализованных модулей общего назначения в составе программного обеспечения системы L2 (как редакторы и компиляторы специализированных языков для L2, система управления базами знаний, сценарные библиотеки и др.), то в первую очередь было необходимо подготовить техническое решение



3(530).indd 90 04.10.2016 14:50:06

для аппаратной среды, в которой будет установлено указанное программное обеспечение, что и привело к адаптированию «Aeroflex Lego» к требованиям WARP. Значительных усилий со стороны разработчиков требуют задачи по выявлению и формализации бортовых сценариев функционирования космического аппарата, а также при определении системы правил и критериев диагностики и обработки нештатных ситуаций. Несмотря на достаточно большое число технических и эксплуатационных особенностей отдельных миссий и платформ, а также полное отсутствие накопленных формализованных знаний по ситуационному управлению полетов, разработчикам удалось создать упрощенные библиотеки компонентных примитивов и шаблоны для баз знаний, которые на этом этапе позволят описать программно-аппаратную среду платформ и ввести ограниченный набор диагностических сценариев.

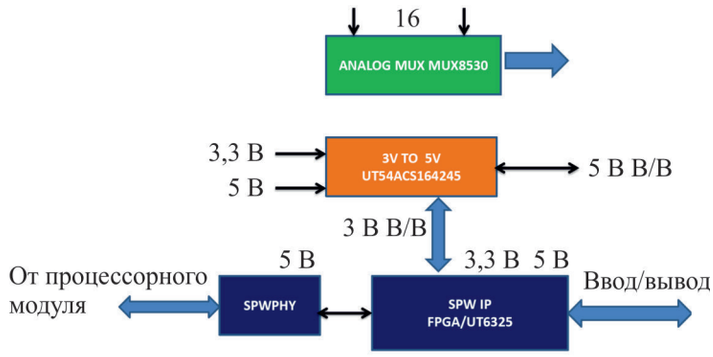



Рис. 3. Вариант модуля ввода-вывода АСОУНС

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает мировая практика, разработка и применение систем типа АСОУНС технически необходимы и экономически целесообразны для любого космического аппарата с САС более 5…7 лет с точки зрения выполнения миссии на заданном функциональном уровне, а также и с точки зрения дополнительной гарантии для сохранения инвестиций по ее реализации.

Планируется завершить реализацию эксперимента по проекту АСОУНС до конца 2016 г. с привлечением широко круга специалистов в области применения систем искусственного интеллекта на борту космических аппаратов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Данилин, Н. С.** Модернизация космической электронной инфраструктуры на основе альянса систем частного применения кристаллов в корпусе / Н. С. Данилин, И. Ю. Булаев, М. А. Бражников, М. К. Соловьев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 4 (527). – С. 41 – 49.

2. **Hayden, S.** Advanced diagnostic system on earth observing one / S. Hayden, S. Christa, S. Shulman. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.

3. **Hayden, S.** Livingstone model-based diagnosis of earth observing one / S. Hayden, S. Christa. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.

4. **Williams, B.** A model-based approach to reactive-self-configuring system / B. Williams, P. Nayak // Proceedings of Thirteenth National Conference of Artificial Intelligence, Portland, 1996.

5. **Димитров, Д. М.** Универсальная система модулей класса QML Q/V «Aeroflex Lego» для построения радиационно стойких систем космической аппаратуры / Д. М. Димитров, Н. С. Данилин, И. Х. Сабиров // Научно-техническая конференция «Высоконадежные системы управления», Москва, Измайлово, 2010.

*Статья поступила 24 августа 2016 г.*



3(530).indd 91 04.10.2016 14:50:06

# ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.382

## АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕССАХ СБОРКИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

**Ю. Н. Калашников, Н. П. Литвиненко, Ю. С. Ранжин**

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

**Рассмотрены основные методы монтажа монолитных интегральных схем сборки многофункциональных твердотельных модулей СВЧ, представлено описание оборудования, отвечающего требованиям автоматизированного производства.**

*КС: автоматизированная сборка, токопроводящий клей, модули СВЧ*

## AUTOMATIC PLANTS IN THE PROCESSES OF ASSEMBLING MULTIFUNCTIONAL MODULES

**U. N. Kalashnikov, N. P. Litvinenko, U. S. Ranzhin**

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

**The main methods of monolithic integrated circuit wiring when assembling multifunctional solid state microwave modules are considered; the description of the equipment meeting the requirements of automation industry is presented.**

*Keywords: automated assembling, current-conducting glue, microwave modules*

При увеличении количества активных монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ в модулях и повышении объемов производимой продукции актуальным становится применение автоматической сборки. При этом обеспечиваются высокая повторяемость, производительность, качество и, в конечном итоге, надежность изделий. Особый интерес вызывает применение сборочных автоматов при изготовлении многофункциональных модулей на операциях монтажа МИС СВЧ на многослойные керамические платы (LTCC). Однако переход на автоматическую сборку предъявляет вполне определенные требования к конструкции изделий, применяемым расходным материалам, комплектующим, таре и квалификации персонала. При организации технологического процесса приклеивания важно правильно выбрать метод, каким будет наноситься клей.

Удобным способом нанесения клея является метод дозирования. Устройство нанесения клея (диспенсер) через установленную в нем иглу дозирует строго определенное количество клея



3(530).indd 92 04.10.2016 14:50:06

на контактную площадку. Но так как поверхность плат имеет относительно высокую неровность (более 0,1 мм) возникала опасность повреждения иглы.

Поэтому приемлемым способом для нанесения клея на LTCC является метод переноса (штампового отпечатка), рис.1. Такой метод хорош при высокой плотности монтажа, т. е. когда кристаллы располагаются практически вплотную друг к другу. В этом случае изготавливаются специальные инструменты – штампы, размеры рабочей части которых рассчитаны на конкретный типоразмер кристалла. Инструмент опускается в емкость с клеем и переносит клей на контактную площадку. Затем автомат установки кристаллов берет соответствующий кристалл и устанавливает точно на то место, где нанесен клей. Такой способ менее чувствителен к неровности поверхности плат.

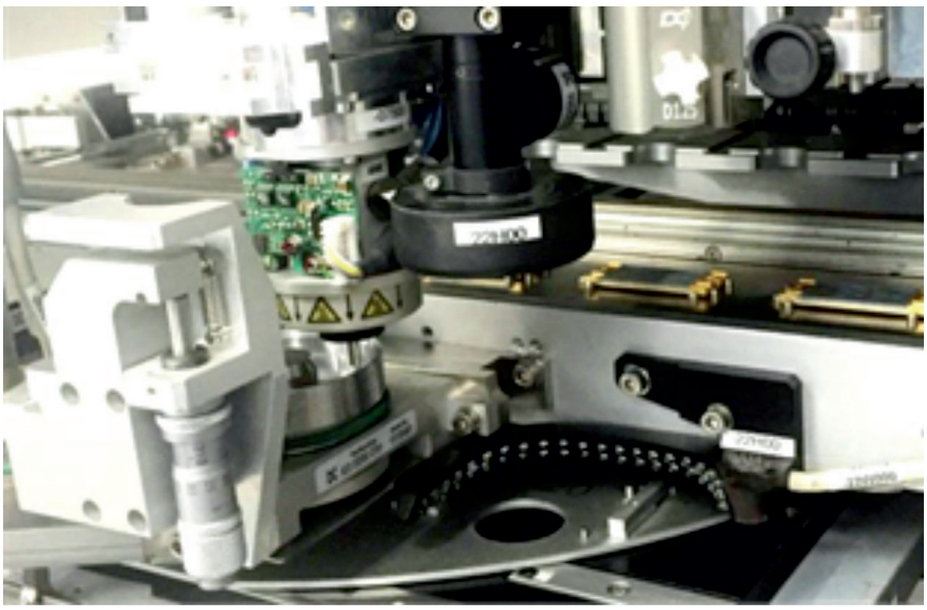


Рис. 1. Оснастка для штампового отпечатка

Также есть установки для нанесения клея «джетером» (от слова jet), аналогичные струйным принтерам, когда дозированная капля клея выстреливается специальной головкой (линейка Asymtec Spectrum фирмы Nordson, недавно такое решение представила Datacon).

Обычно процессы нанесения клея и установки кристаллов реализованы в одной машине. Наиболее подходящей установкой нанесения клея и посадки кристаллов для многофункциональных модулей является установка монтажа кристаллов 2200 EVO австрийской фирмы Datacon. В табл. 1. приведены ее основные технические характеристики.

При сборке многофункциональных модулей на керамические платы монтируется более 20 кристаллов МИС разных типоразмеров. Это означает, что при посадке МИС СВЧ в автоматическом режиме для каждого типоразмера кристалла необходимо использовать свой специальный инструмент. В установке монтажа кристаллов 2200 EVO предусмотрена система автоматической смены инструментов, которая может работать с 7 типоразмерами кристаллов. Но при этом предъявляются достаточно жесткие требования по допускам на геометрические размеры кристаллов и к качеству поверхности подложки в части шероховатости и неплоскостности.



3(530).indd 93 04.10.2016 14:50:06

Таблица 1

| | |
|---|---|
| Максимальное количество слотов магазина для 12-дюймовых пластин | 25 |
| Размер кристалла | 0,17 – 50 мм |
| Занимаемая площадь без загрузочных модулей | 1200 × 1225 мм |
| Рабочая область | 12 × 4,3 дюйма<br>12 × 8 дюймов |
| Ширина подложки | 1 – 4,3 дюйма<br>1 – 8 дюймов |
| Длина подложки | 2 – 13 дюймов |
| Точность | ±10 мкм, 3σ |
| Усилие монтажа | 0,5 – 50 г |
| Нанесение адгезива | методом дозирования и методом переноса |
| Операционная система | Linux |
| Система технического зрения | CMOS-камера |
| Съем компонента с пластины из магазина | типа waffle pack, Gel-Pak® и T&R |
| Интерфейсный монитор | 17 дюймов |
| Точность позиционирования при очень высокой скорости | 25 мкм |
| Карусель для выталкивателей | на 5 инструментов |
| Система автоматической смены инструмента | до 14 типов инструмента |

При выборе клея для автоматической сборки необходимо учитывать не только эксплуатационные характеристики изделия (прочность соединения, электро- и теплопроводность), но и технологические параметры: вязкость, жизнеспособность, сохранение реологии на протяжении всего процесса приклеивания, достаточное время хранения. Были выбраны электропроводящие клеевые композиции на эпоксидной основе, в которых в качестве наполнителя используется мелкодисперсный порошок серебра. Клеевая композиция должна быть стабильна в течение всего процесса сборки кристаллов, то есть обладать постоянной вязкостью, стойкостью к расслоению компонентов композиции, стойкостью к осаждению частиц серебра. При использовании клея иностранного производства появляются дополнительные проблемы. Задержки на таможне. При больших нормах отгрузки и небольшом расходе при монтаже часть клея можно просто не успеть использовать до окончания срока годности. В любое время может быть объявлено эмбарго на поставки. Немаловажную роль играет цена. В современных условиях импортозамещение становится острой необходимостью. На этом основании остановились на клеях ЭЧЭ-С и ТОК-2 производства НИИЭМ (г. Владикавказ). Производитель установки



3(530).indd 94 04.10.2016 14:50:06

Datacon 2200 EVO рекомендовал клей DM6030HK фирмы DIEMAT (купленной недавно японской Namics). Свойства различных типов клея приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Параметр | Наименование клеевой композиции | | |
|---|---|---|---|
| | ЭЧЭ-С* (ЫУО.028.052 ТУ) | ТОК-2* (ШКФЛО.028.002 ТУ) | DM6030HK** |
| Вязкость, Па·с | – | 10 | 30 |
| Индекс тиксотропности | – | 5,3 | 2,3 |
| Жизнеспособность, сут, не менее | 1 | 2 | 0,5 |
| Режим отверждения, °С/ч | 100/4 или 120/1,5 или 150/1 | 170/2 или 200/1 | Многоэтапный: 100 – 125/ 1,5 – 1 175 – 225/0,75 – 0,3 |
| Диапазон рабочих температур, °С | От -60 до +125; 300 – 320 (10 мин) | От -60 до +200; 360 (15 мин) | – |
| Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·см, не более | $5 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-6}$ |
| Предел прочности при сдвиге, МПа | 7,0 | 8,0 | 22 |
| Срок хранения, мес, не менее | 6 (при -6 °С) | 3 (при -6 °С) | 6; 12 (при -40 °С) |

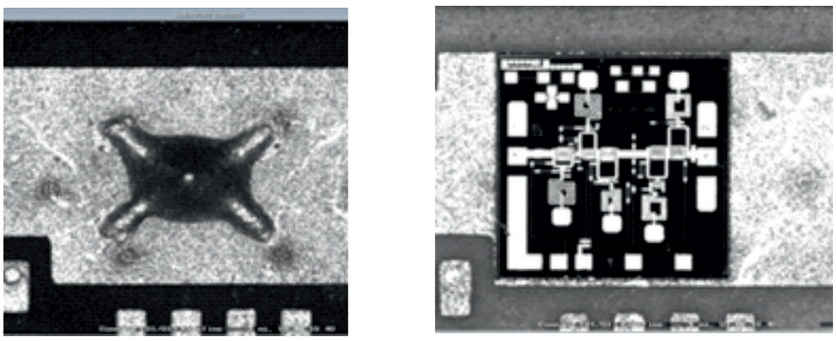
* – клей российского производства, ОАО «НИИ электронных материалов», г. Владикавказ;
** – клей иностранного производства, фирма «DIEMAT», США.

Наибольшую повторяемость формирования отпечатка клея показали клеи ЭЧЭ-С и рекомендуемый фирмой-производителем установки клей DM6030HK. Но было замечено, что жизнеспособность клея фирмы DIEMAT резко падает через 4 ч, структура клея становится рыхлой, так как он содержит в своём составе растворитель, который достаточно быстро улетучивается. Это, в свою очередь, значительно сокращает время процесса его нанесения. Клей марки ЭЧЭ-С показал наибольшую повторяемость отпечатка и жизнеспособность (8 ч) из представленных клеевых композиций (рис. 2). Для получения стабильного отпечатка была уменьшена его вязкость. Вязкость регулировалась добавлением небольшого количества жидкого отвердителя (1,3…1,8 %), являющегося частью рецептуры клея. Производителем допускается увеличение количества отвердителя в пределах 2,2…4,4 %. В этом случае смачивание кристаллов клеем наблюдалось по всему периметру. При отработке параметров нанесения клея марки ТОК-2 была выявлена склонность к тиксотропии, то есть к уменьшению вязкости под действием механического воздействия (перемешивания клея в ванне, контакта инструмента с клеем), из-за этого приходилось постоянно корректировать параметры процесса для получения стабильного отпечатка.

Таким образом, клей марки ЭЧЭ-С является наиболее подходящим для автоматической сборки кристаллов методом переноса, поскольку обладает хорошей повторяемостью отпечатков и до-



3(530).indd 95 04.10.2016 14:50:06



*а*) *б*)

Рис. 2. Отпечаток клея ЭЧЭ-С (*а*) и установленный на него компонент (*б*)

статочной жизнеспособностью. Была проведена сборка опытной партии из 24 модулей СВЧ для АФАР по разработанной технологии, в которых GaAs-кристаллы были посажены на клей марки ЭЧЭ-С. Все модули прошли испытания на вибропрочность, термоциклирование (-65, +85 °С) и термопрогон (+85 °С, 48 ч). Измеренные электрические параметры собранных модулей соответствуют ТУ. Время сборки модуля составило 2,5 мин, т. е. установка за 1 ч работы делает сменную норму 3-х сборщиц.

Перспектива развития автоматического монтажа кристаллов МИС СВЧ включает, на наш взгляд, такие связанные между собой направления, как бесконтактное нанесение клея и разработка собственных рецептур для всего спектра применений. Под бесконтактным нанесением клея следует понимать такой способ, при котором дозированная капля клея струйно подается на контактную площадку. Это позволит применять основания с большей разновысотностью и с большими размерами. Такие задачи есть в новых разработках. Соответственно для таких процессов будут вырабатываться требования к свойствам клеевой композиции. Разработка будет вестись совместно с ведущими научно-исследовательскими институтами страны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Воробьев, Г. А.** Перспективы автоматизированной сборки гибридных интегральных схем с помощью новых полимерных клеев / Г. А. Воробьев, В. М. Николаев, Н. Е. Шубин // Электронная техника. Сер. 7. – 1986. – Вып. 2 (135). – С. 29 – 32.

2. **Костин, А. С.** К вопросу о механизме агрегации наночастиц диоксида титана / А. С. Костин, Э. М. Кольцова // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6 – 3. – С. 647 – 651.

*Статья поступила 16 августа 2016 г.*



3(530).indd 96 04.10.2016 14:50:06

УДК 621.91

# МЕТОДОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ СВЕРХМАЛОГО РАЗМЕРА

**А. А. Курочкин**

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

**Описана методология изготовления прецизионных тонкостенных изделий сверхмалого размера. Проведен анализ факторов, оказывающих влияние на процесс обработки и характеристики детали. Предложены и апробированы методы изготовления элементов фильтра. Проведены исследования влияния комбинаций стратегий обработки на получаемую геометрию изделия.**

*КС: тонкостенные элементы, прецизионная обработка, стратегия фрезерной обработки, миниатюрные детали*

# METHODOLOGY OF MANUFACTURING PRECISION THIN-WALLED MINIATURE PRODUCTS

**A. A. Kurochkin**

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

**The methodology of manufacturing precision thin-walled miniature products has been described. The factors influencing the process of part cutting and characterization have been analyzed. Methods of manufacturing filter elements were suggested and approved. Investigations of the influence of processing strategy combinations on the product geometry have been conducted.**

*Keywords: thin-walled elements, precision processing, strategy of milling processing, miniature parts*

## 1. ВВЕДЕНИЕ И АКТУАЛЬНОСТЬ

АО «НПП «Исток» им. Шокина» является ведущим предприятием России по разработке и производству изделий вакуумной и твердотельной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники.

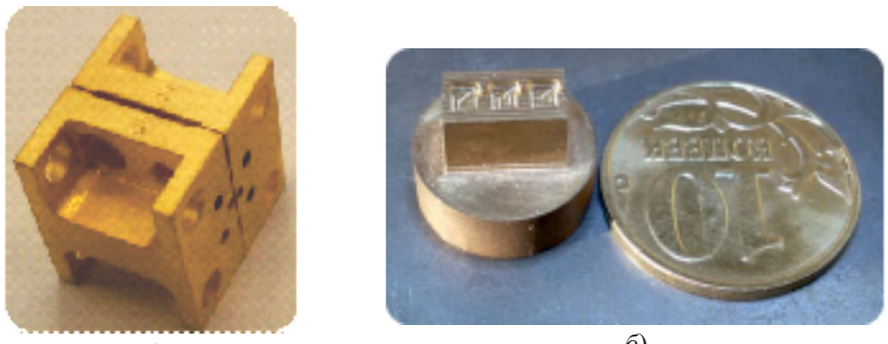
Технология производства СВЧ-приборов такова, что предъявляет очень высокие технические требования по шероховатости поверхности и точности изготовления деталей, которые собирают в узлы, а затем из этих узлов собирают и настраивают СВЧ-приборы.

Рассмотрим на примере изготовления миниатюрного полосно-пропускающего фильтра технологию изготовления микроминиатюрных прецизионных тонкостенных деталей. К изделиям СВЧ, а особенно к тем, которые применяются в бортовой аппаратуре, предъявляются жесткие требования к массогабаритным характеристикам. Уменьшение размеров и снижение массы изделия является одной из актуальных задач любого разработчика СВЧ-техники, но помимо этого необходимо получить еще и требуемые электрические характиристики прибора, которые напрямую зависят от технологии изготовления составных деталей изделия.

На рис. 1 представлены два вида полосно-пропускающих фильтров: в волноводном исполнении и на цепочке связанных резонаторов с выходом на микрополосковую линию соответственно.



3(530).indd 97 04.10.2016 14:50:06



*а*) *б*)

Рис. 1. Полосно-пропускающий фильтр (18×18×15 мм) (*а*)
и фильтр на цепочке связанных резонаторов с несрезанной технологической прибылью (*б*)
(диаметр описанной окружности – 8,6 мм, толщина готового изделия – 1,5 мм)

Фильтр на цепочке связанных резонаторов состоит из двух деталей, показанных на рис. 2. Обе детали должны быть изготовлены с очень высокой точностью и минимально возможной шероховатостью поверхности. При изготовлении этих деталей возникают описанные ниже проблемы.

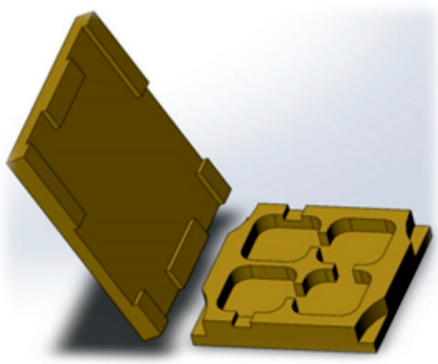


Рис. 2. Фильтр на цепочке связанных резонаторов

## 2. ПРОБЛЕМЫ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Определим основные проблемы, возникающие в процессе изготовления прецизионных тонкостенных изделий со смежными карманами, и проведем анализ причин их возникновения.

### А. Уклон на стенках

Уклон на стенках (рис. 3) образуется вследствие естественного неравномерного износа инструмента и его отгибания от номинальной обрабатываемой поверхности, связанного с параметрами жесткости инструмента и обрабатываемого материала.

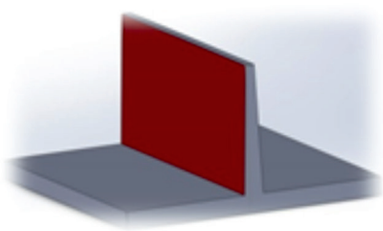


Рис. 3. Отклонение обрабатываемой поверхности
от вертикальной плоскости



3(530).indd 98 04.10.2016 14:50:07

**Б. Произвольная деформация стенки на максимальном удалении ее крайнего положения от основания кармана**

Деформация стенки на максимальном удалении ее крайнего положения от основания кармана (рис. 4) напрямую зависит от степени жесткости обрабатываемой конструкции и вибрационных нагрузок на нее от режущего инструмента.

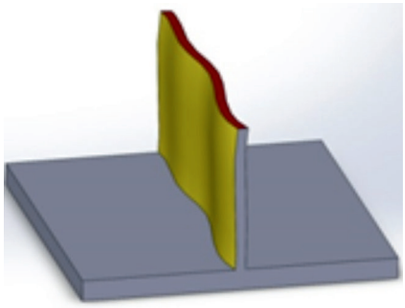


Рис. 4. Деформация обрабатываемой поверхности

**В. Сколы на внешних углах детали и отклонения формы детали от ее истинной геометрии**

Сколы на внешних углах детали и отклонения формы детали от ее истинной геометрии (рис. 5) появляются вследствие отсутствия достаточной жесткости режущего инструмента и при смене направления его перемещения, не выходя из тела материала. При этом возникают дополнительные усилия, затягивающие или отталкивающие инструмент от обрабатываемой поверхности, влияя тем самым на величину съема материала.

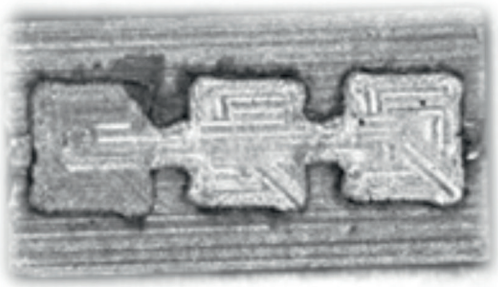


Рис. 5. Пример детали с наличием дефектов
в виде сколов и отклонений формы

**Г. Получение требуемых номинальных значений размеров**

При изготовлении микроминиатюрных деталей получить требуемые номинальные размеры на первой детали не представляется возможным, т. к. ее габаритные особенности не позволяют произвести измерения на станке, также невозможно вручную со стойки станка внести коррекцию на смещение траектории перемещения инструмента.

## 3. СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ

Проведем исследования влияния различных стратегий и их комбинаций на минимизацию и полное устранение дефектов на получаемых поверхностях и геометрии детали.



3(530).indd 99 04.10.2016 14:50:07

**А.** Исключить износ инструмента невозможно, но его можно минимизировать за счет черновой и чистовой обработки. Отгибание режущего инструмента можно также свести к минимуму за счет правильно подобранной геометрии, обеспечивающей в том числе и достаточную жесткость, и снизив нагрузку на инструмент посредством подбора режимов резания и уменьшения величины срезаемого материала.

При послойной обработке смежных карманов, разделенных тонкостенными перегородками, требуется проводить чистовую обработку после каждого удаляемого слоя.

**Б.** Для исключения деформации стенки на максимальном удалении ее крайнего положения от основания кармана требуется правильно определить стратегию послойной обработки. При обработке смежных карманов в зависимости от толщины и высоты обрабатываемых стенок выбирают следующие стратегии (рис. 6, 7).

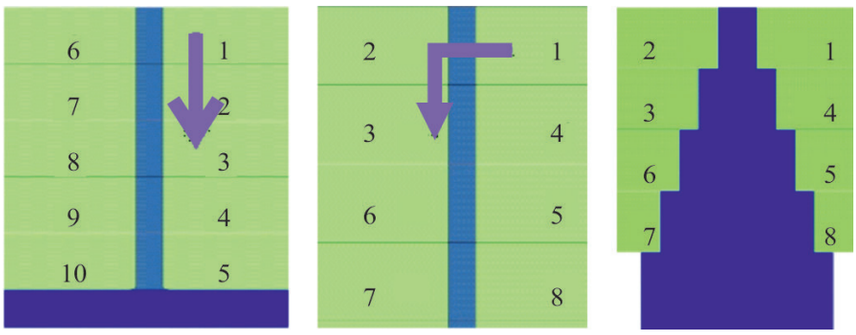



Рис. 6. Варианты стратегии обработки тонкостенных конструкций в зависимости от соотношения толщины перегородки к ее высоте

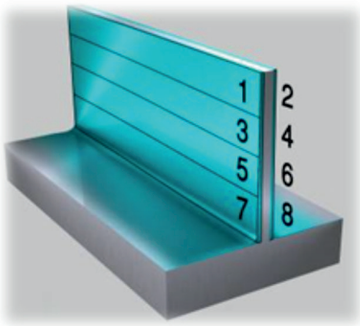



Рис. 7. Стратегия обработки тонкостенной конструкции, применяемая для изготовления рассматриваемых деталей

**В.** Для исключения сколов на внешних углах обрабатываемой детали требуется разделить траекторию перемещения инструмента на завершенные участки. На рис. 8 показаны последовательность и стратегия обработки одного из вариантов фильтра на цепочке связанных резонаторов. Вначале участками и в определенной последовательности выбирается основной материал черновой фрезой ∅0,5 мм, затем осуществляется чистовая обработка выбранного слоя. При обработке последнего слоя плоскость кармана полностью обрабатывается чистовой фрезой.



3(530).indd 100 04.10.2016 14:50:07

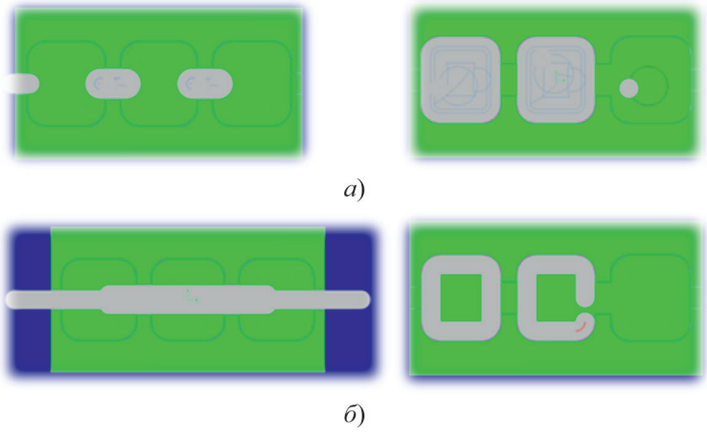



Рис. 8. Черновая (*а*) и чистовая (*б*) обработки

**Г.** Для получения требуемых допускных размеров требуется выполнить следующие условия:

– исследовать зависимость величины отгибания фрезы от ее вылета из патрона на рабочих скоростях резания. Это требуется для выявления оптимальных параметров фиксации режущего инструмента, обеспечения минимальных отклонений в процессе обработки детали и минимизации вибрации;

– провести измерение полученных деталей на микроскопе и с учетом полученных реультатов программно скорректировать смещение траектории перемещения инструмента до получения требуемых значений. Эти процедуры выполняются при каждой замене режущего инструмента по истечении его срока службы;

– собрать статистику по количеству корректно выполненных деталей до момента естественного износа инструмента. Определение срока службы режущего инструмента необходимо для прогнозирования графика по своевременной замене.

## 4. ВЫВОДЫ

Для сравнительной оценки изменения параметров детали в зависимости от применяемой технологии на различных этапах исследования применялись следующие методы. Помимо визуального контроля с помощью оптического измерительного оборудования, для оценки шероховатости обработанной поверхности, уклона стенок карманов и отклонения формы элементов детали от истинной ее геометрии применялся косвенный метод оценки изменения показателей перечисленных параметров. А именно измерение электрических параметров изготовленного полосно-пропускающего фильтра на стенде динамических испытаний. Полученные электрические характеристики изделия показали, что требования, которые были предъявлены к изготовлению деталей фильтра, были полностью выполнены.

В результате проведенной работы была разработана методика изготовления миниатюрных прецизионных тонкостенных деталей, которую можно применить к аналогам различной геометрии.

По данной методике были изготовлены однотипные детали (в том числе Чебышевский ступенчатый переход), показавшие положительные результаты при настройке малой серии опытных СВЧ-приборов (рис. 9).



3(530).indd 101 04.10.2016 14:50:07

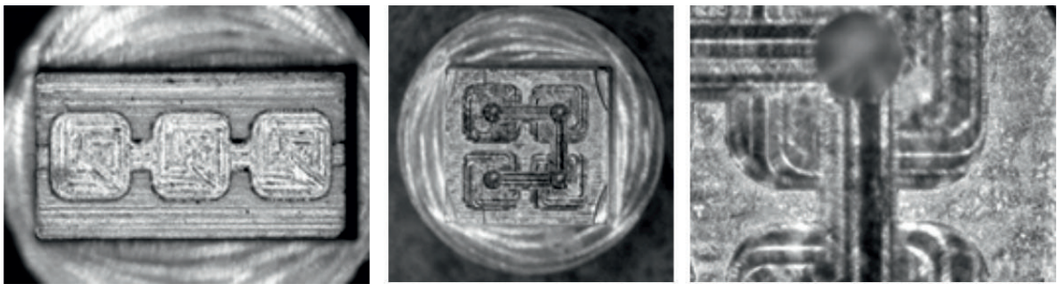


Рис. 9. Результат качественно изготовленных деталей
с применением комбинированных стратегий обработки

ЛИТЕРАТУРА

1. **Голант, М. Б.** Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов / М. Б. Голант и др. – М.: Советское радио, 1969.

*Статья поступила 15 августа 2016 г.*

## НОВЫЕ КНИГИ

**Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследования в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах. Внедрение в производство.** Монография / Под ред. Н. А. Бушуева. – М.: Радиотехника, 2015. – 480 с.: ил. Науч. Серия «Радиоэлектронная борьба».

Представлены результаты исследований, разработок и внедрения в производство сверхширокополосных ЛБВ. Рассмотрены конструкции и технология их изготовления для СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонов. Исследованы способы улучшения технических характеристик ЛБВ, а также вопросы построения усилителей на их основе. Проведен анализ современного состояния научных исследований в области создания новых типов перспективных ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов. Показаны математические модели замедляющих систем таких ЛБВ, а также электронно-оптических магнитных систем формирования и сопровождения электронных пучков с высокой плотностью тока. Приведены методы и примеры расчета.

Для научно-технических работников НИИ, предприятий, ведущих исследование и разработку современных сверхширокополосных ЛБВ в СВЧ-, КВЧ-, ТГЧ-диапазонов. Может быть использована в качестве учебного пособия для студентов вузов, занимающихся вопросами наземной и космической связи, антенными фазированными решетками, передатчиками телевизионного сигнала.



3(530).indd 102 04.10.2016 14:50:07

УДК 621

# ВЫБОР СПОСОБА СВАРКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ КЛИСТРОНОВ

**И. И. Ваганов, С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин**

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

**Рассмотрены особенности электронно-лучевой и аргонодуговой сварки. Показано, что применение электронно-лучевой сварки позволяет снизить технологические потери по повышенному давлению остаточных газов, течам и повышенным токам утечки по изоляторам. Приведены условия, обеспечивающие минимальное время электронно-лучевой сварки при высоком качестве ее результатов.**

*КС: отпаянный ЭВП, магнитный электроразрядный насос, течь, утечка, сварка*

# CHOICE OF THE METHOD OF WELDING OF SMALL-SIZED KLYSTRONS

**I. I. Vaganov, S. A. Vashin, G. F. Korepin**

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

**Features of electron beam and in argon welding are considered. It is shown that application of electron beam welding allows to reduce technological losses on an elevated pressure of residual gases, leaks and the raised leakage currents on insulators. The conditions providing the minimum time of electron beam welding in case of high quality of its results are given.**

*Keywords: sealed-off EVD, magnetic electrodischarge pump, leak, leakage, welding*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современных клистронах к давлению остаточных газов предъявляются высокие требования. Это давление должно быть не выше $1\cdot10^{-5}$ Па [1]. При этом режим сварки ЭВП должен обеспечивать отсутствие течей, превышающих $1\cdot10^{-12}$ м$^3$·Па/с, согласно конструкторской документации на прибор. С учетом срока хранения ЭВП (12 лет), натекание не должно превышать $1\cdot10^{-15}$ м$^3$·Па/с.

Другим важным условием является минимальное влияние процесса сварки на параметры ЭВП: ток электронной эмиссии катода не должен ухудшаться под воздействием паров свариваемых металлов. Следовательно, необходимо обеспечить такой поток атомов свариваемых металлов в область катода, при котором эмиссионные свойства катода остаются неизменными [2, 3].

Сварка электронных пушек с корпусами клистронов производилась с использованием аргонодуговой установки. Этот способ не зарекомендовал себя как полностью отвечающий требованиям производства ЭВП:

– доля приборов, у которых после откачки давление остаточных газов превышало допустимую норму, составляла 1,4 %;



3(530).indd 103 04.10.2016 14:50:07

– 5,4 % клистронов имели токи утечки по изоляторам между электродами пушки выше установленной нормы;

– 1,5 % приборов имели течи в области сварки электронной пушки с корпусом ЭВП.

Анализ дефектных клистронов показал, что основной причиной выявленных дефектов является аргонодуговая сварка:

– причиной повышенного давления газов отпаянных клистронов явилось образование газовых пузырей во время проведения аргонодуговой сварки с последующим выходом газов в вакуумный объем отпаянных приборов;

– токи утечки возникали после проведения сварки;

– течи обусловлены ростом кристаллической структуры свариваемых металлов в области аргонодуговых швов и образованием трещин.

В связи с этим в процессе сварки необходимо избегать напыления металла на катод и изоляторы, появления пористости металла и трещин, снижать влияние остаточных механических напряжений, возникающих в области шва.

## 2. СПОСОБ СВАРКИ

Существенными преимуществами по сравнению с аргонодуговой сваркой обладает электронно-лучевая сварка [4, 5]:

а) бесконтактность нагрева;

б) высокая степень чистоты;

в) минимальное тепловое воздействие;

г) минимальное количество газовых пузырей в зоне шва;

д) незначительный рост кристаллов свариваемых материалов или отсутствие их роста по сравнению с ростом кристаллов в процессе проведения аргонодуговой сварки;

Сварка электронным лучом кроме указанных преимуществ имеет и недостатки:

– большая длительность достижения необходимого вакуума;

– в процессе сварки происходит прямое напыление плавящегося металла на незащищенные изоляторы, катод, сетку электронной пушки клистрона;

– при нагреве свариваемых кромок электронным лучом происходит интенсивное газовыделение, которое может привести и к окислению деталей пушки ЭВП, что недопустимо, так как окисленные детали плохо обезгаживаются в процессе откачки прибора [2], а это приводит к повышенному давлению остаточных газов в отпаянном клистроне и снижению долговечности клистрона;

– после проведения сварки электронным лучом требуется длительное остывание узла под вакуумом во избежание окисления на воздухе деталей сваренной сборочной единицы.

Для того чтобы не допустить отрицательного влияния газовой среды на ЭВП, рассчитано максимально допустимое давление газа во время проведения электронно-лучевой сварки с учетом особенностей трубопроводов и мест расположения преобразователей давления по известным формулам вакуумной техники. Это давление соответствует молекулярному течению газа в области сварочной ванны [2, 6].

Напыление паров металла из сварочной ванны исключено за счет использования специальной экранирующей оснастки, защищающей катод и изоляторы. Для исключения вредного воздей-



3(530).indd 104 04.10.2016 14:50:07

ствия газовыделения во время проведения сварки применено предварительное обезгаживание свариваемых деталей в атмосфере водорода при температуре 800 °С.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Использование электронно-лучевой, вместо аргонодуговой, сварки позволило снизить технологические потери ЭВП (рис.1).

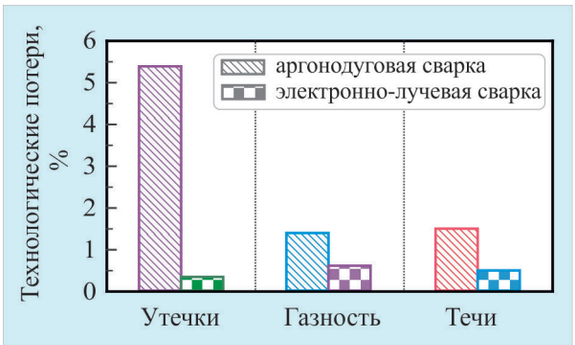



Рис. 1. Сравнение технологических потерь по токам утечки в изоляторах (утечки), по величине давления остаточных газов, превышающих установленную норму (газность), и течам выше установленной нормы (течи)

С целью анализа качества сварного шва проведен металлографический анализ. Данные анализа показаны на рис. 2, из которого следует:

– сварной шов, полученный электронно-лучевой сваркой, не имеет скрытых полостей и пузырей, которые наблюдались при анализе аргонодуговых швов, следовательно, нет выхода газа в вакуумный объем клистрона и внезапного повышения его давления;

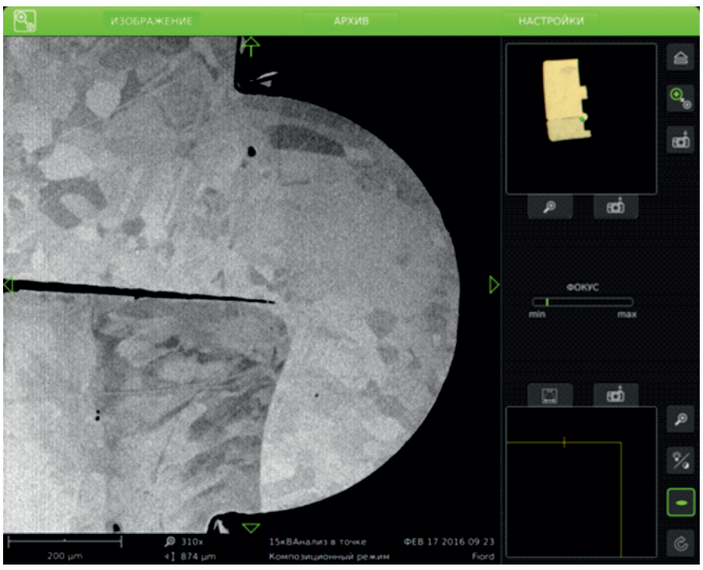



Рис. 2. Микрошлиф шва электронно-лучевой сварки пушки и корпуса клистрона



3(530).indd 105 04.10.2016 14:50:07

– кристаллическая структура материалов после проведения электронно-лучевой сварки не претерпела существенных изменений: размеры кристаллов в зоне шва и вне зоны шва примерно одинаковы;

– глубина проплавления металла достаточна для получения вакуумно-плотного шва и составляет 0,35 мм;

– сварной шов равномерный по толщине, что обеспечивает низкий уровень механических напряжений в области шва;

– глубина проплавления металла в зоне сварки исключает возможность проникновения паров металла из сварочной ванны на детали электронной пушки и не достигает внутренних полостей клистрона.

Контроль давления газа отпаянного клистрона и натекания проводился согласно методикам [7, 8].

## 4. ВЫВОДЫ

1. Для проведения качественной электронно-лучевой сварки ЭВП необходимо откачать рабочую камеру установки до давления, более низкого, чем давление, соответствующее режиму молекулярного течения газа, и не допускать повышения этого давления в процессе сварки. Максимально допустимое давление газа зависит от геометрических параметров сварочной камеры, трубопроводов системы откачки и быстроты откачки высоковакуумного насоса и является индивидуальной величиной конструкции установки.

2. Если детали предварительно качественно очищены и обезгажены, то в процессе образования сварочной ванны наблюдается снижение давления газа в сварочной камере.

3. В сварочной ванне электронно-лучевой сварки по результатам анализа микрошлифов не обнаружено образования газовых пузырей.

4. Оптимальная глубина сварочной ванны, ее конструктивное расположение относительно свариваемых кромок и надежная защита свариваемых узлов от напылений испаряемого металла из сварочной ванны практически исключают воздействие напылений на катод и изоляторы. Снижение токов утечки по изоляторам электронной пушки ЭВП обеспечивается также условиями конденсации паров металла в канале между свариваемыми кромками и экранировкой катода и изоляторов от попадания паров металлов.

5. Замена аргонодуговой на оптимальную электронно-лучевую сварку позволяет снизить технологические потери по натеканию, повышенному давлению остаточных газов ЭВП и повышенным величинам токов утечки по изоляторам.

6. Контроль натеканий и давления газа клистрона обеспечивается измерением динамики тока магнитного электроразрядного насоса отпаянного ЭВП. Чувствительность течеискания – не хуже $1 \cdot 10^{-14}$ м$^3$·Па/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Алямовский, И. В.** Электронные пучки и электронные пушки / И. В. Алямовский. – М.: Советское радио, 1966.

2. **Черепнин, Н. В.** Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1967.

3. **Черепнин, Н. В.** Сорбционные явления в вакуумной технике / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1973.



3(530).indd 106 04.10.2016 14:50:07

4. **Николаев, Г. А.** Специальные методы сварки / Г. А. Николаев, Н. А. Ольшанский. – М.: Машиностроение, 1975.

5. **Конюшков, Г. В.** Специальные методы сварки плавлением в электронике / Г. В. Конюшков, В. Г. Конюшков, В. Ш. Авагян. – Издательско-торговая корпорация "Дашков и КГ", 2013.

6. **Корепин, Г. Ф.** Проблемы откачки металлокерамических ЭВП СВЧ / Г. Ф. Корепин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2008. – № 4 (497). – С. 23 – 46.

7. **Корепин, Г. Ф.** Классификация течей ЭВП СВЧ / / Г. Ф. Корепин, А. А. Стефаненко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. Материалы юбилейной научно-технической конференции. – 2003. – № 1 (481). – Часть 1. – С. 45 – 51.

8. **Корепин, Г. Ф.** Простой способ отбраковки натекающих и “газных” ЭВП / / Г. Ф. Корепин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 1999. – № 2. – С. 42–43.

*Статья поступила 24 августа 2016 г.*

## НОВЫЕ КНИГИ

ГАРЕЕВ Г.З., ЛУЧИНИН В.В. **Терагерцовые системы и технологии** (обзор современного состояния) / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб., 2015. – 228 с.

Представлен системный обзор основных достижений в области разработки терагерцовых излучателей, приемников, компонентов радиотрактов, а также систем радиовидения и спектроскопии на сентябрь 2015 г. Рассмотрены основные области применения терагерцовых систем и технологий в научных исследованиях и разработках в сферах нанотехнологий, биологии и медицины, телекоммуникаций и в аппаратуре для обеспечения безопасности.

Издание содержит значительный объем иллюстраций и ссылок на источники информации с целью обеспечения современного уровня профессиональных компетенций в рассматриваемой быстропрогрессирующей области науки и техники.

Книга может быть полезна научным сотрудникам и инженерам, специализирующимся в области разработки, изготовления и применения терагерцовых систем и технологий, а также преподавателям, аспирантам и студентам, участвующим в образовательном процессе по направлениям «Электроника и наноэлектроника», «Радиотехника», «Приборостроение», «Нанотехнологии и микросистемная техника», «Фотоника и оптоинформатика».

Подготовлена сотрудниками кафедры микро- и наноэлектроники и Центра микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».



3(530).indd 107 04.10.2016 14:50:08

# ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОПЫТ

УДК 658.274

## ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПРЕДПРИЯТИЮ

**П. И. Цай, С. В. Яковлев, А. Г. Рокитянский,**
**М. В. Городецкая, Е. С. Горшкова, Ю. С. Ланцов, Д. А. Ширяев**

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

**Описаны разработанные методики и современная автоматизированная аппаратура для аттестации испытательного оборудования**

*КС: аттестация, методика аттестации, нормируемые точностные характеристики*

## THE ARRANGEMENT OF CERTIFICATION PROCEDURE FOR TESTING EQUIPMENT AT ENTERPRISE

**P. I. Tsai, S. V. Yakovlev, A. G. Rokityansky,**
**M. V. Gorodetskaya, E. S. Gorshkova, U. S. Lantsov, D. A. Shiryaev**

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

**The developed methodologies and up-to-date automated equipment for certification of testing equipment have been described.**

*Keywords: certification, certification methodology, rated precision characteristics*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Испытания, в частности механические и климатические, являются эффективным методом оценки надежности и прочности разрабатываемых и выпускаемых изделий. При этом режимы климатического и механического воздействия обеспечивает испытательное оборудование.

Испытательное оборудование – это техническое средство для воспроизведения условий эксплуатации, которое также должно периодически проходить аттестацию.

Аттестация испытательного оборудования и оснастки предусматривает определение нормируемых точностных характеристик оборудования и устанавливает пригодность оборудования и оснастки к эксплуатации и применению.

### 2. ОБЩЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Нормируемые метрологические характеристики средств испытаний и средств измерений регламентируются НТД [1, 2].



3(530).indd 108 04.10.2016 14:50:08

Метрологические характеристики средств измерений определяются путем поверок и аттестации в специализированных органах Госстандарта, метрологические характеристики средств испытаний – техническими службами, эксплуатирующими оборудование, совместно с метрологическими службами.

Основной задачей метрологического обеспечения испытаний является обеспечение однозначности испытательных режимов. Метрологическое обеспечение гарантирует единство режимов измерений параметров при оценке стойкости и устойчивости изделий.

Лабораторные испытания должны быть эквивалентны условиям реальной эксплуатации и обеспечивать воспроизводимость результатов испытаний.

Разумеется, ни один метод испытаний не может в полной мере отразить реальные условия эксплуатации, включая любую географическую точку или любую точку космоса. При этом решающее значение имеет обеспечение точности режимов испытаний, что реализуется путем аттестации испытательного оборудования.

Аттестация испытательного оборудования, в особенности механического, является длительным и трудоемким процессом, включающим в себя многочисленные измерения и трудоемкие вычисления метрологических характеристик воспроизводимых режимов испытаний.

На предприятии в эксплуатации находится около 450 единиц испытательного оборудования и процесс аттестации этого оборудования отнимает значительное время в ущерб производству основной продукции.

В целях освобождения участков основного производства от несвойственных им специфических работ, на предприятии создана специализированная группа по аттестации испытательного оборудования, как это делается в крупных испытательных центрах.

Группа в полном составе укомплектована высококвалифицированным инженерно-техническим персоналом, оснащена современной автоматизированной поверочной аппаратурой, значительно повышающей качество и производительность трудоемких измерений и вычислений. Разработан стандарт предприятия по аттестации испытательного оборудования.

В настоящее время группой аттестации разработаны программы и методики аттестации климатического испытательного оборудования, вибрационных и ударных стендов.

Уже первые итоги работы группы аттестации позитивно оценены разрабатывающими и выпускающими подразделениями.

Ниже приводится содержание разработанных методик и описание поверочной аппаратуры, применяемых при аттестации.

## 3. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ АТТЕСТАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методика аттестации является практическим руководством и служит критерием обеспечения однозначности испытательных режимов, а также устанавливает средства, с помощью которых осуществляются операции аттестации.

Методика устанавливает объем аттестации с перечнем обязательных операций аттестации. Это следующие параметры измерения:

– предельная пониженная температура;
– предельная повышенная температура;
– значения промежуточных температур;



3(530).indd 109 04.10.2016 14:50:08

– относительная влажность при различных температурах;
– время достижения предельных температур.

Методика устанавливает вычисляемые параметры:
– градиент температур;
– амплитуда колебаний температуры;
– вариации температур для каждого датчика;
– дисперсия и среднеквадратическое отклонение;
– градиент относительной влажности;
– амплитуда колебаний влажности для каждой точки;
– амплитуда колебаний влажности в камере;
– скорость циркуляции;
– градиент скорости циркуляции.

Такое немалое количество точностных параметров обеспечивает однозначность испытательных режимов.

Методика устанавливает правила и порядок установки датчиков для измерения температуры, количество датчиков, предполагаемое рабочее пространство, в точках которого должны быть установлены датчики. В зависимости от полезного объема камер назначается количество точек установки датчиков: для камер объемом до 2000 л рекомендуется устанавливать 9 датчиков, для камер объемом более 2000 л – дополнительно еще 6 датчиков, всего 15 датчиков.

Схемы подключения датчиков к измерительным приборам приводятся в описании аппаратуры МИТ-8.

Для измерения скорости циркуляции воздушного потока датчики устанавливаются в центре камеры так, чтобы чувствительный элемент датчика был направлен навстречу воздушному потоку.

Проведению непосредственного процесса аттестации предшествует ряд обязательных подготовительных процедур, а именно проверка документации на камеру, комплектности документации, правильности оформления формуляров. Важным моментом перед проведением аттестации является внешний осмотр. При этом особое внимание должно быть уделено отсутствию повреждений, посторонних предметов и загрязнений внутри камеры, состоянию электрических соединений, состоянию маркировки на камере, внешнему виду камеры и ее сборочных единиц, которые должны соответствовать эксплуатационным документам на камеру.

Особое внимание должно быть уделено выполнению требований безопасности: наличию оформленных установленным порядком актов, протоколов, заключений на соответствие требованиям безопасности, а также требований к заземлению, электрической изоляции, средствам пожаротушения.

При опробовании необходимо провести оценку срабатывания защиты камеры по температуре, в соответствии с требованиями ЭД.

Кроме того, должны быть проведены замеры параметров, характеризующих условия проведения аттестации.

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

1. Определение скорости циркуляции воздушного потока. Этот параметр измеряется в тех случаях, когда это оговорено в эксплуатационной документации.



3(530).indd 110 04.10.2016 14:50:08

2. Определение точностных характеристик в режиме воспроизведения температуры.

2.1. Устанавливают максимальную и минимальную базовую температуру.

Проводят измерение температуры для каждого датчика непрерывно в течение 30 мин общим числом измерений не менее 30.

Аналогично проводят измерения при остальных промежуточных температурах: от минимальной до максимальной.

2.2. Определяют скорость нагрева камеры, измеряют интервал времени между минимальным и максимальным изменениями температуры, в том числе между 10 и 90 % полного диапазона.

Выключив камеру, замеряют время охлаждения камеры.

2.3. Определяют характеристики камеры в режиме воспроизведения относительной влажности.

Определение достигнутых значений относительной влажности и температуры проводят в следующем порядке: фиксируют показания датчиков температуры и влажности воздуха, установленных в центре полезного объема камеры; при помощи психрометрических таблиц или непосредственно показаний средств аттестации определяют значения абсолютной влажности.

Конечным результатом аттестации камер для испытаний на стойкость к воздействию относительной влажности является построение климатограммы.

Вычисляют все достигнутые значения параметров в камере, приведенные в начале этого раздела.

3. Обработка результатов измерений.

Все вычисления параметров аттестуемой камеры производятся автоматически, что значительно повышает производительность трудоемких вычислений [3].

## 5. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ АТТЕСТАЦИИ ВИБРАЦИОННЫХ И УДАРНЫХ СТЕНДОВ

Методика аттестации служит руководящим документом и практическим руководством для аттестации вибрационных и ударных стендов.

Методика обеспечивает однозначность испытательных режимов и устанавливает средства измерений при аттестации.

Методика регламентирует объем аттестации с перечнем обязательных операций аттестации.

Для вибрационных и ударных стендов это следующие параметры:

– диапазон воспроизведения частот;

– диапазон воспроизведения виброперемещения и виброускорения;

– собственные шумы на столе стенда;

– диапазон воспроизведения уровней спектральной плотности ускорения;

– пиковое значение ускорения при воспроизведении стендом ударных импульсов;

– длительность ударного импульса;

– форма кривой ударного импульса;

– наличие магнитного поля рассеяния на столе стенда;

– резонансные частоты подвижной системы вибростенда.

Это незыблемые параметры вибрационных и ударных стендов, от стабильности которых зависит качество воспроизводимых режимов испытаний.



3(530).indd 111 04.10.2016 14:50:08

Отдельные параметры критичны для определенных изделий, например наличие внешнего магнитного поля рассеяния на столе стенда критично для электронных приборов с электронной фокусировкой электронного пучка и может привести к деформации электронного пучка и отказу изделия. Собственные шумы на столе стенда могут быть критичны для чувствительных к механическим воздействиям изделий. По этой причине эти параметры должны быть замерены и оптимизированы.

Остальные перечисленные выше параметры определяют собственно условия и режимы воспроизведения условий эксплуатации и испытаний.

Обязательное условие при аттестации вибрационного и ударного испытательного оборудования – это стабильность воспроизводимых параметров, ибо от точности поддержания воспроизводимых параметров режима испытаний зависит качество испытаний.

Нижеперечисленные параметры и показатели стабильности должны быть неукоснительно соблюдены:

– коэффициент гармоник по ускорению определяет наличие высших гармоник воспроизводимых частот, что недопустимо;

– коэффициент поперечных составляющих и коэффициент неравномерности стола стенда; их наличие приводит к дополнительным нагрузкам на испытуемое изделие;

– резонансные частоты подвижной системы, к которым могут быть критичны испытуемые изделия;

– точность поддержания виброударных нагрузок, что может привести к неоднозначности режимов воздействия.

При ударных воздействиях параметр длительности ударного импульса определяет спектр частот.

## 6. ПОДГОТОВКА К АТТЕСТАЦИИ

Вибрационные и ударные стенды представляют собой сложное радиотехническое, электромеханическое, электронное устройство, требующее особо тщательной подготовки к аттестации.

Ряд неукоснительных правил необходимо соблюдать при подготовке к аттестации:

– стенд должен быть укомплектован балластным грузом, применяемым при аттестации;

– место установки измерительного вибропреобразователя (акселерометра) должно гарантировать строгую соосность с вертикальной осью подвижной системы стенда;

– необходимо обеспечить соединение используемой аппаратуры с общей точкой заземления и надежную электрическую изоляцию между акселерометром и эквивалентным балластным грузом.

## 7. ПРОВЕДЕНИЕ АТТЕСТАЦИИ

При аттестации непосредственно перед измерениями параметров необходимо проводить внешний осмотр и опробование работы стенда.

При этом особое внимание уделяется соблюдению норм и требований охраны труда и безопасности, наличию средств защиты и средств пожаротушения.

Необходимо протоколировать параметры условий окружающей среды, а также качество электропитания стенда.



3(530).indd 112 04.10.2016 14:50:08

## 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНДА

Методика предусматривает определение следующих параметров [4]:
– диапазоны перемещения и ускорения;
– коэффициент гармоник по перемещению и ускорению;
– коэффициент поперечных составляющих;
– коэффициент неравномерности ускорения на столе;
– резонансные частоты подвески и первая резонансная частота подвижной системы;
– нестабильность ускорения и частоты;
– погрешности воспроизведения ускорения и перемещения;
– диапазон воспроизведения уровня спектральной плотности ускорения;
– характеристики ударного импульса.

Измеренные выше параметры вычисляются автоматически и выдаются в виде протокола замеров.

## 9. АППАРАТУРА МИТ-8

В качестве средства измерения при аттестации климатических камер используется многоканальный прецизионный измеритель температуры МИТ-8. Аппаратура предназначена для выполнения измерений температуры, в том числе при проведении калибровочных и поверочных работ [5].

В качестве первичных преобразователей температуры – термометры сопротивления; платиновый эталонный (образцовый) первичный преобразователь температуры – платиновый термометр сопротивления ПТС-10М со статическими характеристиками преобразования, представленными в таблицах зависимости термоЭДС от температуры.

Прибор имеет 8 или 16 каналов, которые могут измерять сигналы от разных датчиков.

Принцип действия аппаратуры состоит в измерении сопротивления ТС или термоЭДС, затем по введенным статическим характеристикам преобразователя вычисляется температура. Статические характеристики преобразователя вводятся в измеритель температуры МИТ-8 при помощи персонального компьютера.

Результаты измерения включенных каналов отображаются на дисплее.

Управление измерителем температуры осуществляется либо с клавиатуры МИТ-8, либо с персонального компьютера.

Измеритель температуры имеет встроенную память для записи и хранения результатов измерения, которые могут быть считаны с помощью компьютера.

Наличие в приборе интерфейса RS-232 и USB позволяет создать автоматизированную систему, автоматизированное рабочее место поверителя.

Аппаратура компактная, надежная, высокоэффективная и высокопроизводительная, включена в Госреестр средств измерений.

## 10. АППАРАТУРА ВС-207

Для аттестации вибрационных и ударных установок используется высокоточная прецизионная калибровочная аппаратура ВС-207 [6].



3(530).indd 113 04.10.2016 14:50:08

Для этой системы разработано специальное программное обеспечение VS Meter для аттестации вибрационного испытательного оборудования анализа импульса удара, воспроизводящего ударным стендом.

Система VS Meter находится в Реестре СИ.

Программа позволяет измерять:

– частоту вибровоздействия;
– амплитуду виброперемещения и виброускорения;
– среднее квадратическое ускорение;
– коэффициент гармоник;
– коэффициент неравномерности ускорения на столе;
– коэффициент поперечных составляющих стола;
– амплитудно-частотные характеристики.

Данные измерений сохраняются на экране дисплея.

Система укомплектована трехкомпонентным виброизмерительным преобразователем (акселерометром), позволяющим производить измерения вибрации одновременно в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Применение при измерениях трехкомпонентного измерителя оправдано и с технической точки зрения, так как позволяет минимизировать систематическую погрешность и значительно повышает производительность и эффективность процесса аттестации.

## 11. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Централизованная аттестация испытательного оборудования значительно улучшила его состояние и качество на предприятии и, как следствие, качество выпускаемой продукции. Производственные участки более ответственно стали относиться к состоянию испытательного оборудования и к проведению испытаний выпускаемой продукции.

В процессе аттестации выявлен ряд испытательного оборудования, которое потребовало ремонта и наладки средств измерения режимов испытаний.

Это обеспечило поддержание точностных характеристик в допускаемых пределах и стабильности поддержания режима испытаний.

Следует отметить, что 70 % от общего числа эксплуатируемого оборудования выпуска 1960–1997 гг. не обеспечивало требуемой точности поддержания параметров испытаний.

Ремонт и наладка этого оборудования довели этот показатель до минимума.

Практически 100 % оборудования выпуска 1998–2015 гг. удовлетворяет требованиям по поддержанию точностных параметров.

Таким образом, весь наличный парк испытательного оборудования доведен до удовлетворительного состояния, что гарантирует объективный и качественный контроль выпускаемой продукции.

Следующие точностные характеристики климатических камер были получены в процессе аттестации конкретной камеры тепла:

Среднее значение температуры в камере:

при базовом значении 70 °С..... 68,83 °С
при базовом значении 85 °..... 84,04 °С
при базовом значении 100 °С..... 95,93 °С



3(530).indd 114 04.10.2016 14:50:08

Амплитуда колебания температуры..... 0,68 – 0,87 °С
Градиент неравномерности..... 0,47 °С
Максимальное отклонение температуры..... 1,17 °С
Значение вариации температуры..... 0 – 0,33 °С

Таким образом, приведенные точностные характеристики измеренных тепловых камер свидетельствуют о том, что техническое состояние испытательных камер на достаточно хорошем уровне.

## 12. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОНКРЕТНОЙ ВИБРОИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Как показали результаты измерений, основные нормируемые точностные параметры, как-то: точность поддержания виброперемещения и виброускорения, коэффициенты гармоник и поперечных составляющих, а также собственные шумы стенда – ниже допустимых значений по техническим требованиям, что свидетельствует о высоком качестве вибрационной испытательной установки, используемой при испытаниях выпускаемых изделий. Это обстоятельство напрямую способствует повышению качества и надежности выпускаемых изделий. Следует особо отметить наличие высших гармоник в спектре вибрации, они составляют не более 3…5 %, что свидетельствует о высоком качестве воспроизводимых колебаний.

## 13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание специализированной группы по аттестации испытательного оборудования на предприятии было логическим шагом в организационно-техническом плане по повышению эффективности и качества выпускаемых изделий. Одновременно подразделения, выпускающие продукцию, освобождены от несвойственных для них работ по аттестации специфического оборудования и имеют возможность больше внимания и сил уделять основной деятельности.

Разумеется, качество аттестации испытательного оборудования, проведенной специализированной службой, значительно выше в техническом плане.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **ГОСТ Р 8.568-97.** Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
2. **СТП ТСО 12.04 СК-2015.** Система менеджмента качества. Аттестация испытательного оборудования.
3. **ГОСТ Р 536.18-2009.** Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний к воздействию температур.
4. **ГОСТ 25051.03-83.** Установки вибрационные электродинамические. Методы и средства аттестации.
5. Руководство пользователя аппаратуры МИТ-8.
6. Руководство по эксплуатации аппаратуры ВС-207.

*Статья поступила 23 марта 2016 г.*



3(530).indd 115 04.10.2016 14:50:08

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

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

2. Статья должна содержать:

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

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

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

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

Сложные формулы набираются только в “Редакторе формул” Word. Непосредственно в Worde 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 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG, для рисунков – формат GIF); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

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

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

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

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

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

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

11. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.



3(530).indd 116 04.10.2016 14:50:08

# ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2017 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 3600 руб., включая НДС (18 %). Издается в цветном варианте.

*Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).*

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 509950001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (495)465-86-12. Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

**З А К А З**

Прошу принять подписку на научно-технический сборник "Электронная техника", серия 1, "СВЧ-техника" на 2017 г. и направлять по адресу:

Куда _____

(почтовый индекс, адрес)

_____

Кому _____

(название организации)

_____

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____

на сумму _____ за _____ экз.


# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

**«СВЧ-ТЕХНИКА»**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

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

| | | |
|---|---|---|
| Подписано к печати 28.9.2016 г. | Усл. п. л. 14,25 | Формат 60×88 1/8 |
| Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ" | Уч.-изд. л. 14,75 | Тираж 500 |
| г. Москва | Индекс 36292 | 15 статей |


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

3(530).indd 117 04.10.2016 14:50:08

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2016, вып. 3(530), с. 1-116

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

3(530).indd 118 04.10.2016 14:50:08