

УДК 537.876

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СОГЛАСОВАННЫЕ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ ФЕРРОЭПОКСИДА

В. Н. Семенов, К. М. Басков, Д. И. Акимов, А. А. Политико,
В. А. Чистяев, А. Ю. Зарубина

Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13

Статья поступила в редакцию 3 июля 2019 г.

Аннотация. Представлен широкополосный радиопоглощающий материал на основе ферроэпоксида, который может быть использован для изготовления волноводных согласованных нагрузок. Проведены численные и экспериментальные исследования электродинамических свойств волноводных согласованных нагрузок из этого материала для нескольких типов волноводов в СВЧ диапазоне частот. Исследовались разные варианты формы вставки из радиопоглощающего материала и определялись её оптимальные геометрические размеры. Представлены рассчитанные частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению волноводных согласованных нагрузок с оптимальной геометрией вставок для волноводов WR-159, WR-112 и WR-90. Показана высокая эффективность применения в согласованных нагрузках в широком диапазоне частот радиопоглощающего материала на основе ферроэпоксида, состоящего из модифицированного порошка карбонильного железа и эпоксидной смолы. Предварительные материалы работы докладывались на Всероссийской микроволновой конференции в ноябре 2018 г.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, волноводная согласованная нагрузка, коэффициент стоячей волны, электродинамическое моделирование.

Abstract. Waveguide terminators form a part of many microwave systems. One of the most significant values of waveguide terminators is the standing wave coefficient. Low level of the standing wave coefficient value of waveguide terminator is achieved by placing into it a resistive element made from appropriate radar absorbing material

of special shape. A radar absorbing material with unique electromagnetic properties was developed. The material based on carbonyl iron and epoxy resin. The possible application of the material was studied at the paper. Particularly, it is shown that the radar absorbing material can be used for manufacturing of waveguide terminators of waveguide types WR-159, WR-112 и WR-90. The calculation results for waveguide terminators with absorbers having simple wedge, pyramid and exponential wedge shapes with optimized geometrical parameters are shown. Calculations are performed by the electrodynamic modeling software package FEKO using electrodynamic parameters, such as permittivity and permeability of the material measured on a sheet sample. Verification of numerical simulation results were performed on the WR-159 waveguide with the simple wedge-shaped absorber. Implementation of the developed radar absorbing material one allows to achieve low values of standing wave coefficient at the lower length of the absorber that can find benefits in the application of small microwave devices.

Key words: radar absorbing material, waveguide terminator, standing wave coefficient, electromagnetic design.

Введение

Волноводные согласованные нагрузки (ВСН) широко используются в радиотехнике и относятся к числу наиболее распространённых элементов СВЧ-трактов. Основными тенденциями развития ВСН являются снижение массогабаритных показателей, совершенствование технологии их производства и уменьшение уровней отражённой мощности в максимально широкой полосе частот. В работе рассматриваются ВСН в виде короткозамкнутого на одном конце отрезка волновода с расположенным внутри объемным поглотителем из магнитного радиопоглощающего материала (РПМ). Одной из основных характеристик, позволяющей оценить эффективность ВСН, является коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВн). Малые значения КСВн этих нагрузок достигаются выбором широкополосного РПМ с оптимальными электрофизическими характеристиками, а также выбором оптимальных

размеров и формы вставок из этого РПМ. Так, в [1] при конструировании ВСН X-диапазона частот с нагрузкой из поглотителя марки ECCOSORB FGM-40 были получены значения КСВн меньше 1,07 при длине нагрузки 50 мм и меньше 1,03 при длине 70 мм.

В настоящей работе представлены результаты расчётов КСВн ВСН с поглощающими вставками в форме клина, пирамиды и экспоненциального клина из РПМ на основе ферроэпоксида, состоящего из модифицированного порошка карбонильного железа и эпоксидной смолы. Расчёты проводятся в диапазонах частот трёх типов волноводов: WR-159, WR-112 и WR-90, что составляет диапазон частот от 4,8 до 12 ГГц. В работе представлены результаты верификации численного моделирования по результатам измерений КСВн ВСН для волновода типа WR-159.

1. Описание радиопоглощающего материала

Используемый в расчетах РПМ типа РАН-89 изготавливается из ферроэпоксида, основными компонентами которого являются модифицированное карбонильное железо, эпоксидная смола и реологические добавки. РПМ обладает низкой степенью пористости, высокой однородностью и воспроизводимостью электрофизических свойств.

В расчётах КСВн ВСН со вставками из РПМ разных форм использовались значения диэлектрической и магнитной проницаемости РПМ, определённые с помощью методики измерений [2] в свободном пространстве. Эта методика измерений основана на измерении комплексных коэффициентов прохождения и отражения квазиплоской электромагнитной волны образца материала с помощью сверхширокополосных диафрагмированных линзовых рупорных антенн и векторного анализатора электрических цепей R&S ZVA40. В отличие от методики измерений параметров ферроэпоксида в коаксиальной воздушной линии [3], методика измерений параметров материала в свободном пространстве [2] обеспечивает надежное измерение комплексных параметров материала ферроэпоксида, обладающего значительными магнитными потерями в широкой полосе частот.

Образец материала для определения электродинамических параметров РПМ изготовлен в форме плоского диска толщиной около 10 мм и диаметром 190 мм. Измеренные значения диэлектрической и магнитной проницаемости материала ферроэпоксида представлены на рис. 1.

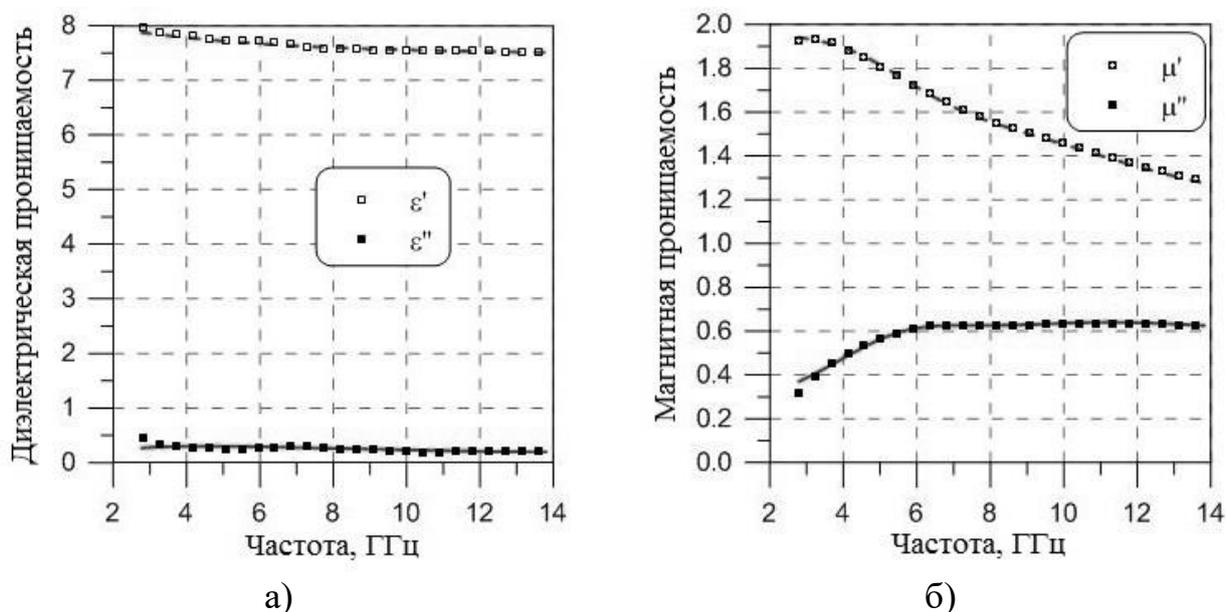


Рис. 1. Частотная зависимость диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемости ферроэпоксида типа РАН-89

Ферроэпоксид из РПМ РАН-89 обладает низкой диэлектрической проницаемостью, низким тангенсом диэлектрических потерь, высокой магнитной проницаемостью и значительными магнитными потерями в диапазоне частот 5-12 ГГц.

2. Постановка задачи

Численное моделирование проводилось для волноводов трех типов – WR-159, WR-112 и WR-90. Геометрические размеры и рабочий диапазон частот волноводов, которые использовались в расчётах, представлены в таблице 1.

Расчёт КСВн ВСН со вставками из магнитного РПМ проходил после определения оптимальных геометрических размеров этих вставок. Оптимизация геометрических размеров вставок из магнитного РПМ происходила численно с помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO [4]. Электродинамическая модель состояла из отрезка

короткозамкнутого волновода. С одной стороны волновода через порт подключался источник электромагнитного возбуждения, а с короткозамкнутой стороны волновода устанавливалась вставка из РПМ различной формы. Расчёт параметра S_{11} порта в такой модели осуществлялся методом моментов. Для вычисления оптимальных геометрических размеров каждой из форм вставки из РПМ использовалась встроенная в программу FEKO процедура оптимизации. Оптимизация осуществлялась симплекс-методом, с помощью которого находился минимум целевой функции в виде максимального значения модуля параметра S_{11} в рабочей полосе частот в зависимости от геометрических размеров вставки из РПМ.

Таблица 1. Параметры волноводов.

Тип волновода	Сечение волновода ($a \times b$), мм	Рабочий диапазон частот, ГГц
WR-159	40,39 × 20,19	4,80 – 6,85
WR-112	28,50 × 12,62	6,85 – 9,93
WR-90	22,86 × 10,16	8,15 – 12,05

3. Результаты численного моделирования волноводных согласованных нагрузок со вставками разных форм

Для расчётов КСВн ВСН с различными формами вставок из РПМ были выбраны такие формы как клин, пирамида и экспоненциальный клин, геометрия которых представлена на рис. 2. Поглощающие вставки из РПМ в форме клина и экспоненциального клина на концах образовывали ступеньки высотой 0,05 мм (минимальная толщина вставки из РПМ для технологической воспроизводимости вставок), а вставка из РПМ в форме пирамиды обладала остриём с размерами 0,05 × 0,05 мм. Вставки из РПМ в форме клина и экспоненциального клина устанавливались по центру относительно широкой стенки волновода, а вставка из РПМ в форме пирамиды своим основанием полностью заполняла короткозамкнутую стенку волновода. Длина вставок L принималась равной утроенной широкой стороне сечения волновода. При

оптимизации геометрических размеров вставки из РПМ в форме клина происходил поиск оптимальных значений H и K (см. рис. 2а); оптимизация вставки из РПМ в форме пирамиды не проводилась, вместо этого значение L выбиралось равным утроенной длине широкой стенки волновода (см. рис. 2б); для вставки из РПМ в форме экспоненциального клина оптимизировались значения M , N и P (см. рис. 2в). Экспоненциальный профиль клина вдоль волновода задавался функцией:

$$y(x) = P \left(e^{\frac{x}{L} \ln \left(\frac{N}{P} + 1 \right)} - 1 \right), \quad (1)$$

где x – координата вдоль волновода; $y(x)$ – высота вставки вдоль узкой стенки волновода в точке x ; P – некоторый параметр, который определяет крутизну экспоненциального профиля (большая крутизна соответствует меньшему значению параметра P).

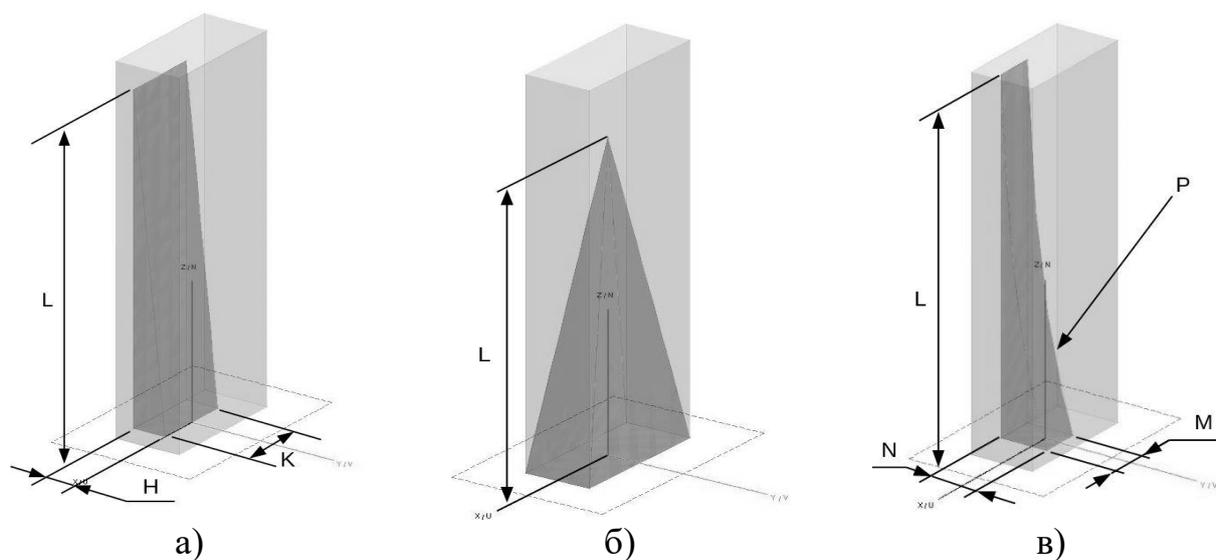


Рис. 2. Волноводы с поглощающими вставками в форме клина (а), пирамиды (б) и экспоненциального клина (в)

На рис. 3 представлены вычисленные частотные зависимости КСВн ВСН, содержащих вставки из РПМ разных форм, геометрические размеры которых, приведённые в таблице 2, получены в результате решения задачи оптимизации. Из результатов расчётов видно, что наибольшей эффективностью обладает вставка из РПМ, выполненная в форме экспоненциального клина.

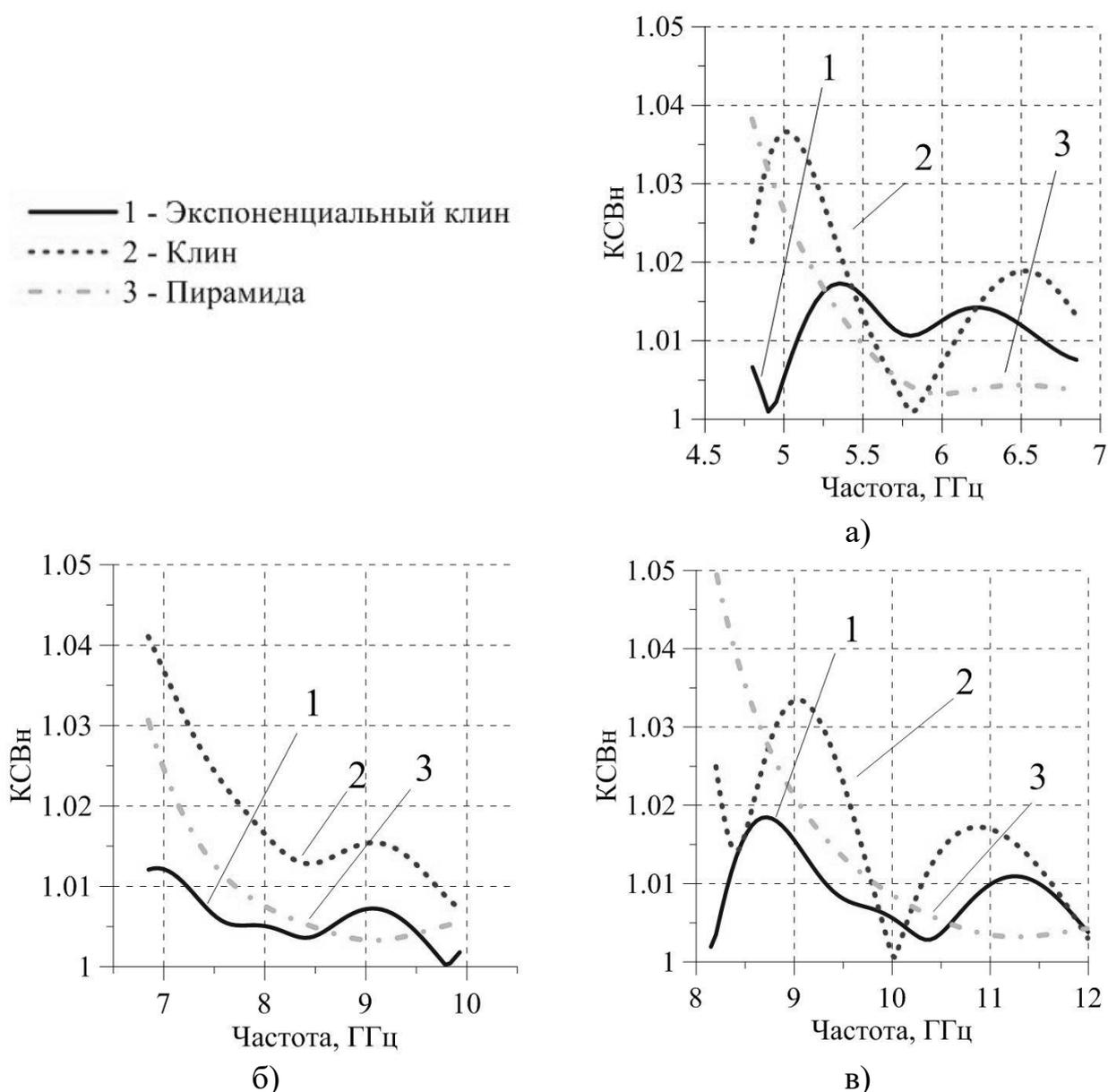


Рис. 3. Частотные зависимости КСВн согласованных нагрузок WR-159 (а), WR-112 (б) и WR-90 (в) с радиопоглощающими вставками различных форм с оптимальными геометрическими параметрами, указанными в таблице 2

Таблица 2. Геометрические параметры вставок из РПМ различных форм.

Тип волновода	Клин			Пирамида	Экспоненциальный клин			
	L, мм	H, мм	K, мм	L, мм	L, мм	M, мм	N, мм	P, мм
WR-159	115	15	12	115	115	16	20	1,60
WR-112	80	11	6	80	80	26	12	0,66
WR-90	65	8	4	65	65	10	10	1,55

Максимальные значения КСВн таких согласованных нагрузок не превышают величину 1,02 для всех трёх типов волноводов в их рабочих диапазонах частот. Следует отметить, что решение задачи оптимизации геометрических размеров вставки в форме экспоненциального клина приводило к двум альтернативным решениям. В одном случае вставка обладала большим значением M и большей крутизной (меньший параметр P), а другая форма, наоборот – имела меньшее значение M и меньшую крутизну (большой параметр P). ВСН со вставками из РПМ в форме клина, которые являются наиболее простыми в изготовлении, обладают КСВн, не превышающими значения 1,04. КСВн согласованных нагрузок со вставками из РПМ в форме пирамиды не превышают 1,05 для всех трёх типов волноводов.

4. Результаты численного моделирования волноводных согласованных нагрузок со вставками разной длины для волновода типа WR-90

Для оценки поглощающей способности материала проведены расчёты КСВн нагрузок со вставками разной длины. Расчёт проведён в рабочей полосе частот ВСН для волновода типа WR-90, размеры которого приведены в таблице 1. Вставка из РПМ имеет форму обычного клина (см. рис. 2а). Расчёты КСВн ВСН проводились со вставками длиной L равной 50 мм, 100 мм и 150 мм. При каждой длине L предварительно были определены значения ширины и высоты вставки (K и H на рис. 2а), обеспечивающие наилучшие значения КСВн. Следует отметить, что вычисленные геометрические параметры K и H вставок из РПМ в форме клина (см. рис. 2а), являются оптимальными для ВСН со вставками любой длины в волноводе типа WR-90 и близки к приведённым в таблице 2. Толщина РПМ на конце клина принималась равной 0,2 мм. Результаты расчётов КСВн ВСН со вставками из РПМ с оптимальными геометрическими параметрами приведены на рис. 4.

При уменьшении длины вставки из РПМ, начиная от 100 мм, у ВСН наблюдается резкое увеличение КСВн и при 50 мм он достигает уровня 1,06. При том, что значения КСВн ВСН со вставками из РПМ 100 мм и 150 мм не превышают 1,02 и 1,01 соответственно.

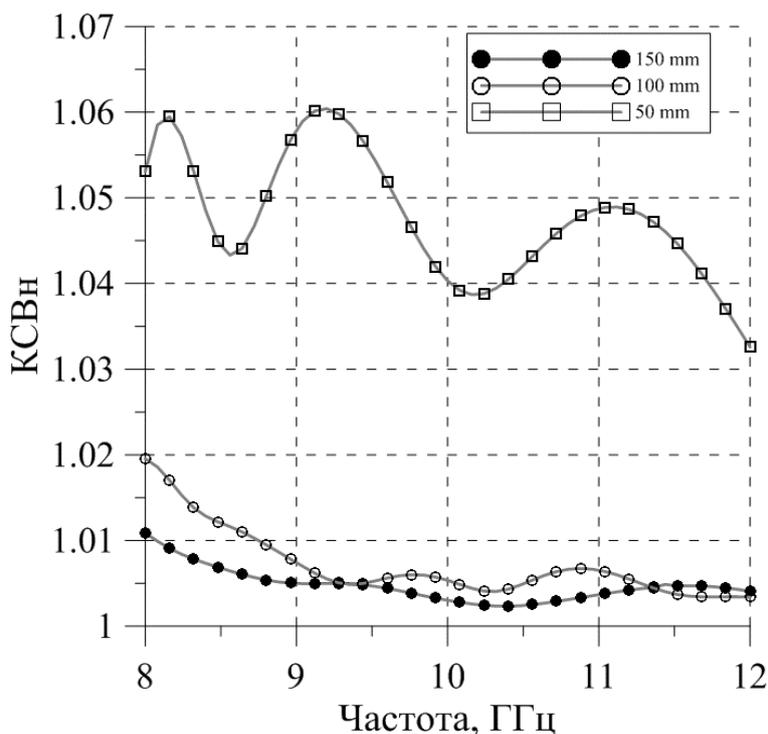


Рис. 4. Частотная зависимость КСВн волноводных согласованных нагрузок типа WR-90 с клиновидными вставками из РПМ длиной 50 мм, 100 мм и 150 мм

5. Верификация результатов численного моделирования

Для верификации результатов численного моделирования были изготовлены два образца вставки из РПМ на основе ферроэпоксида РАН-89 для изготовления ВСН для волновода типа WR-159. Внешний вид образцов вставок из РПМ РАН-89 представлен на рис. 5. Образцы вставки выполнены в форме обычного клина с размерами в поперечном сечении $10,8 \times 11,8$ мм (К \times Н) и длинами L равными 118,1 мм и 123,2 мм соответственно. Образцы вставки из РПМ устанавливались в отрезок волновода типа WR-159 по центру широкой стенки. Измерение отражательных характеристик полученных таким образом образцов ВСН выполнялось в частотном диапазоне 4,8...6,8 ГГц с помощью векторного анализатора цепей. Полученные измеренные и рассчитанные частотные зависимости КСВн образцов ВСН представлены в сравнении на рис. 6.

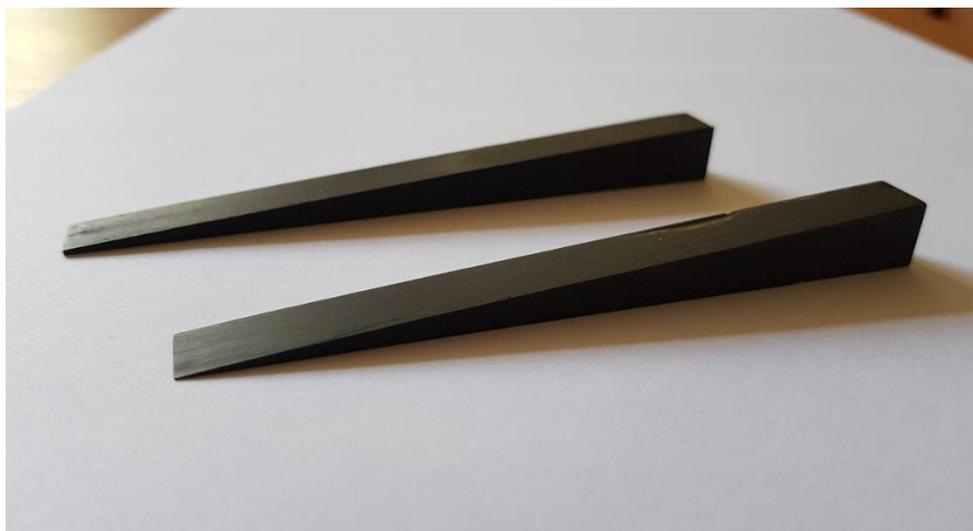


Рис. 5. Внешний вид двух образцов вставок из РПМ на основе феррооксида для волновода типа WR-159

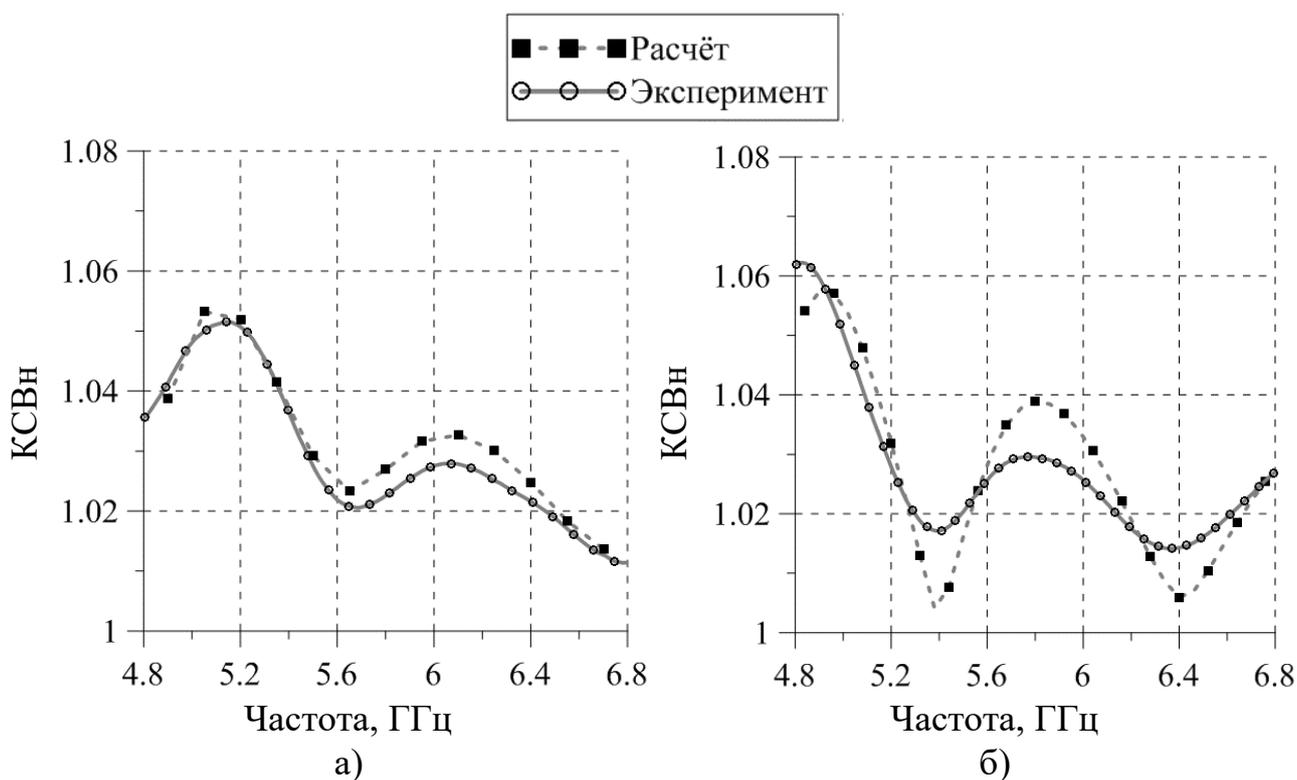


Рис. 6. Измеренные и рассчитанные частотные зависимости КСВн образцов волноводных согласованных нагрузок для волновода типа WR-159 со вставками из РПМ в форме клина с размерами в поперечном сечении 10,8 мм × 11,8 мм и длинами 118,1 мм (а) и 123,2 мм (б)

Следует отметить, что существующие небольшие расхождения теоретических и экспериментальных кривых скорее связаны не с

погрешностями численного моделирования, а с погрешностями позиционирования вставок из РПМ внутри волноводов, с некоторыми отклонениями их геометрии от идеальной клиновидной формы и с погрешностями измерений. Размеры вставок были выбраны для удобства изготовления, которые не обеспечивают минимальный уровень КСВн.

Заключение

В настоящей работе проведены численные исследования электродинамических свойств волноводных согласованных нагрузок со вставками трёх форм из радиопоглощающего материала на основе феррооксида. Показано, что разработанный радиопоглощающий материал на основе феррооксида типа РАН-89 обладает высокой эффективностью для изготовления радиопоглощающих вставок для волноводных согласованных нагрузок. Разработанный материал позволяет обеспечить низкий коэффициент стоячей волны согласованных волноводных нагрузок в широком диапазоне частот. При этом, по предварительным оценкам, максимальная поглощаемая мощность волноводных нагрузок со вставками из этого материала составляет порядка нескольких ватт.

Из полученных результатов расчётов КСВн волноводных согласованных нагрузок со вставками трёх форм (клин, пирамида и экспоненциальный клин) видно, что наибольшей эффективностью обладают радиопоглощающие вставки из феррооксида в форме экспоненциального клина. Но следует отметить, что клин с экспоненциальным профилем достаточно сложно выполнить с высокой точностью. Несмотря на это, на практике могут быть применены вставки из РПМ на основе феррооксида в форме обычного клина, которые при оптимально подобранных геометрических размерах также могут обеспечить достаточно низкие уровни КСВн волноводных согласованных нагрузок. Существенных преимуществ применения в волноводных согласованных нагрузках вставок из РПМ в форме пирамиды по сравнению со вставками из РПМ в форме клина не обнаружено.

Расчётным путём определено, что вычисленные геометрические параметры (ширина и высота) вставок из РПМ в форме обычного клина являются оптимальными для ВСН со вставками любой длины в волноводе типа WR-90.

Литература

1. Stander T., P.W. van der Walt, P. Meyer. A comparison of simple low-power wedge-type X-band waveguide absorbing load implementations // AFRICON 2007, Windhoek, Namibia. - September 2007. pp. 1-4.
2. Басков К.М., Политико А.А., Семененко В.Н., Чистяев В.А. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/7/text.pdf>
3. Алексеенков В.И., Галдецкий А.В., Васильев В.И., Потапова В.И. Измерение параметров ферроэпоксидной керамики на СВЧ // Сборник статей V Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. Том 1. С. 51-55.
4. Altair FEKO – многофункциональный программный комплекс для численного электромагнитного моделирования (СЕМ) для решения широкого спектра исследовательских и инженерных задач. [электронный ресурс]. Available at <https://www.altair.com>

Для цитирования:

В.Н. Семененко, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико, В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе ферроэпоксида. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.9