

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.372(41)
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.61-67

Дата поступления: 22.11.2019
Дата принятия: 04.12.2019

Современное состояние и перспективы развития проектирования и технологии керамических фильтров для бортовой СВЧ-аппаратуры

В.А. Козлов, А.Л. Кунилов, М.М. Ивойлова

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС имени Ю.Е. Седакова»
603137, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
ул. Тропинина, 47

В настоящей статье рассмотрены основные вопросы проектирования и технологии керамических фильтров для бортовой приемной и передающей аппаратуры СВЧ-диапазона на примере разработок филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова». Представлены созданные здесь за последние годы типы полосно-пропускающих фильтров на коаксиальных керамических резонаторах. Рассмотрены особенности их конструкций и технологии при изготовлении на базе НИИ, в том числе при необходимости изготовления в короткие сроки ограниченного количества коаксиальных керамических резонаторов полосно-пропускающих фильтров произвольной формы и размеров. Приведены результаты текущих разработок полосно-пропускающих фильтров, планируемых к применению в перспективной аппаратуре.

Ключевые слова: полосно-пропускающие фильтры, коаксиальные керамические резонаторы, СВЧ-приемники и передатчики.

Введение

При проектировании приемной и передающей аппаратуры СВЧ-диапазона важными компонентами, определяющими ее основные характеристики (чувствительность и избирательность, уровень ослабления внеполосных и побочных излучений), являются полосно-пропускающие фильтры (ППФ). Параметры этих фильтров могут существенно отличаться между собой как в зависимости от их функционального назначения в аппаратуре, так и от назначения самой аппаратуры. Наиболее сложной технической задачей является создание фильтров для аппаратуры, устанавливаемой на борту летательных аппаратов, где кроме электрических параметров необходимо выполнение требований по обеспечению минимальных габаритов и массы, высокой механической прочности и термостабильности. Отечественный и зарубежный опыт разработки бортовой СВЧ-аппаратуры показывает оптимальность построения таких фильтров на основе малогабаритных колебательных систем, изготовленных из высокочастотных термостабильных керамических материалов, – коаксиальных керамических резонаторов (ККР). В настоящее время большинство предприятий-разработчиков бортовой аппаратуры используют

покупные фильтры разработки как отечественных, так и зарубежных производителей.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (НИИИС) в процессе разработки бортовых приборов накоплен значительный опыт проектирования и изготовления на собственной технологической базе фильтров СВЧ-диапазона, закрывающих всю их требуемую номенклатуру, при этом технологический уровень НИИИС позволил реализовать конструкции ППФ с не имеющими аналогов характеристиками.

В настоящей статье представлены созданные за последние годы в НИИИС типы ППФ на ККР, рассмотрены особенности их конструкций и технологии изготовления, приведены результаты текущих разработок ППФ, планируемых к применению в перспективной аппаратуре. Проектирование фильтров осуществлялось по разработанной авторами методике, учитывающей особенности технологии изготовления ККР на данном предприятии. Оптимизация их параметров проводилась с использованием разработанных в институте математических моделей ППФ.

В заключении статьи определены направления дальнейших исследований по совершенствованию характеристик ППФ и технологии их изготовления.

1. Обзор завершенных разработок НИИИС по созданию ППФ на ККР

Разработка ППФ на ККР в условиях НИИИС стала возможной ввиду высокого уровня технологической оснащённости предприятия: наличия участка изготовления керамики, участка механической обработки керамических материалов, а также оборудования лазерной и ультразвуковой обработки керамических заготовок. Освоение технологии изготовления ККР – основного компонента ППФ, а также разработка методики проектирования ППФ позволили обеспечить собственные потребности НИИИС в частотно-избирательных устройствах СВЧ-диапазона.

В процессе разработки ППФ на ККР особенности конструкций, применяемых в НИИИС, определялись спецификой построения функциональных схем и условий применения аппаратуры, для которой разрабатывались эти ППФ. В исходных данных учитывались: численные значения рабочих частот, особенности построения функциональных схем, наличие или отсутствие механических воздействий, уровни импульсной и непрерывной СВЧ-мощности входных сигналов, ослабление внеполосных сигналов.

Применяемые в приемной и передающей аппаратуре ППФ решают следующие основные задачи:

- предварительная фильтрация принимаемого сигнала с целью обеспечения избирательности и динамического диапазона устройства;
- сосредоточенная фильтрация сигнала на промежуточной частоте с целью обеспечения чувствительности устройства;
- выходная фильтрация сигнала с целью ослабления внеполосных и побочных излучений.

На рис. 1 представлены основные типы конструкций ППФ на ККР, применяемых в НИИИС [1].

Данные ППФ были применены в следующих разработках НИИИС.

Образец ППФ, приведенный на рис. 1, а, предназначался для установки в тракт промежуточной частоты приемников КВЧ-диапазона, отличался малыми габаритами при высокой крутизне скачков амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). ППФ подобной конструкции использовались также при разработке анализатора спектра в качестве входных фильтров и фильтров сосредоточенной селекции [2].

Образец ППФ, приведенный на рис. 1, б, предназначался для установки в радиолокационный измерительный комплекс в качестве дискримина-

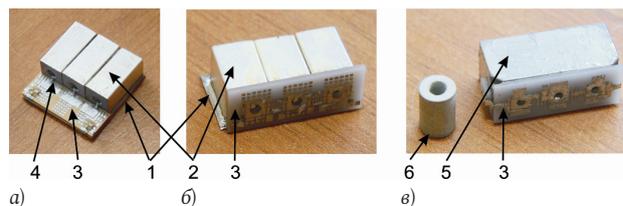


Рис. 1. Внешний вид образцов ППФ на ККР: 1 – металлическое основание; 2 и 6 – четвертьволновые ККР квадратного и круглого сечения; 3 – согласующая микроплата; 4 – ленточные перемычки; 5 – металлический корпус

тора цифровой системы АПЧ и фильтра сосредоточенной селекции [3].

Образец ППФ, приведенный на рис. 1, в, предназначался для применения в приборах с повышенными требованиями к механическим воздействиям.

Типовые АЧХ для трехрезонаторных ППФ на ККР приведены на рис. 2.

Изготовление керамических заготовок для ККР в НИИИС осуществляется с применением двух видов технологии:

- прессование керамического порошка в пресс-форме с последующим обжигом;
- механическая обработка керамических брусков с получением заготовки с требуемыми размерами.

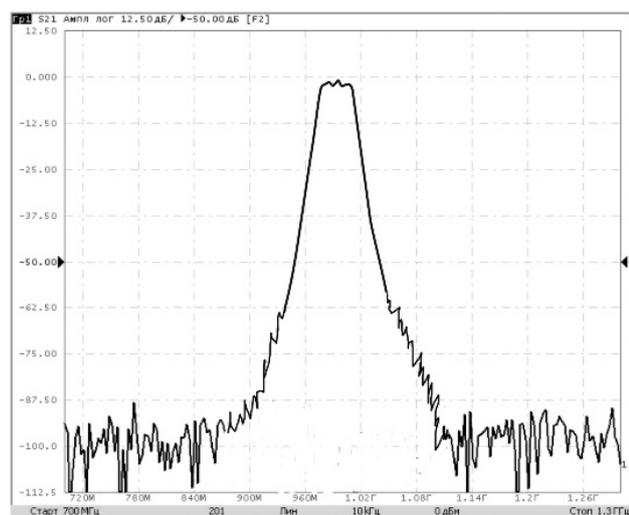
Последняя технология разработана в НИИИС и применяется в качестве экспресс-технологии при необходимости изготовления в короткие сроки ограниченного количества резонаторов произвольной формы и размеров [4].

Конечным этапом изготовления ККР является металлизация поверхностей керамической заготовки путем нанесения на поверхности серебро-содержащей пасты с последующим вжиганием.

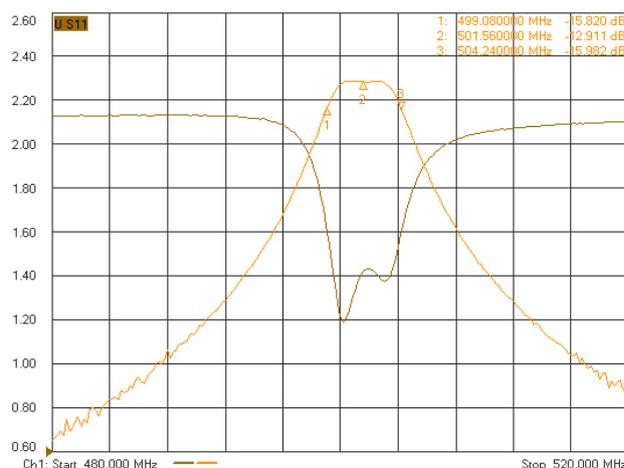
Перед изготовлением проводятся расчет и оптимизация параметров ППФ с использованием математических моделей ККР, учитывающих технологию их изготовления методами механической обработки керамических заготовок, и полосно-пропускающих СВЧ-фильтров на их основе. В модели ППФ учтены разбросы конструктивно-технологических и электрофизических параметров ККР, обусловленные особенностями существующей в НИИИС экспресс-технологии их изготовления [5].

2. Новые конструкции ППФ для перспективной аппаратуры НИИИС

Рассмотренные выше варианты исполнения ППФ (рис. 1) могут применяться в устройствах с уровнем пропускаемой СВЧ-мощности сигналов



а)



б)

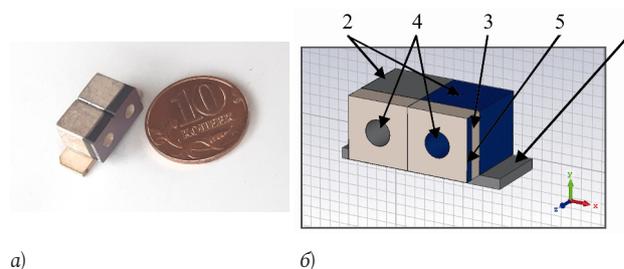
Рис. 2. Типовые АЧХ трехрезонаторных ППФ: а) входной фильтр ($f_0 = 1$ ГГц, $\Delta f = 50$ МГц, $\delta \leq 1,5$ дБ); б) – фильтр сосредоточенной селекции ($f_0 = 0,5$ ГГц, $\Delta f = 5$ МГц, $\delta = 11$ дБ)

не более 1 Вт, что обусловлено низким пробивным напряжением конденсаторов связи на согласующей микросхеме.

При решении задач выходной фильтрации сигналов с целью исключения внеполосных и побочных излучений передатчиков или входной предварительной фильтрации полезного сигнала в приемниках, работающих в условиях воздействия мощных активных помех, к ППФ предъявляются повышенные требования к уровню пропускаемой СВЧ-мощности. Для решения данных задач в НИИИС был разработан ППФ с повышенным уровнем пропускаемой СВЧ-мощности. Внешний вид и 3D-модель ППФ приведены на рис. 3 [1].

Конструктивно данный ППФ представляет собой установленные на металлическое основание (1) и гальванически соединенные между собой боковыми поверхностями отрезки короткозамкнутых с одной стороны коаксиальных керамических линий. Каждая линия представляет собой выполненные как один конструктивный элемент резонатор (2) и конденсаторы связи его с другим резонатором или внешним устройством. Конденсаторы связи отделены от резонатора зазором в металлизации внешней поверхности линии (3), их обкладками являются внутренний проводник (4) и боковые поверхности отрезка линии от зазора до открытого торца (5), причем на горизонтальных поверхностях линии в области формирования емкостей связи металлизация отсутствует.

Формирование емкостей связи в виде керамических конденсаторов обеспечивает конденсаторам связи высокие значения напряжения пробоя. Особенности данного ППФ являются простота



а)

б)

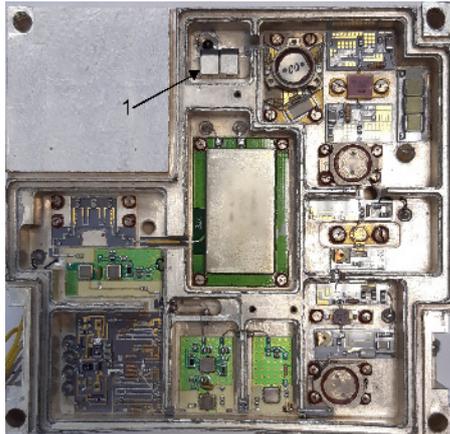
Рис. 3. Внешний вид (а) и 3D-модель (б) двухрезонаторного ППФ с повышенным уровнем пропускаемой СВЧ-мощности

конструкции, высокая технологичность при изготовлении, высокая механическая прочность, малые масса и габариты. Новизна конструкции ППФ подтверждена патентом на изобретение [6].

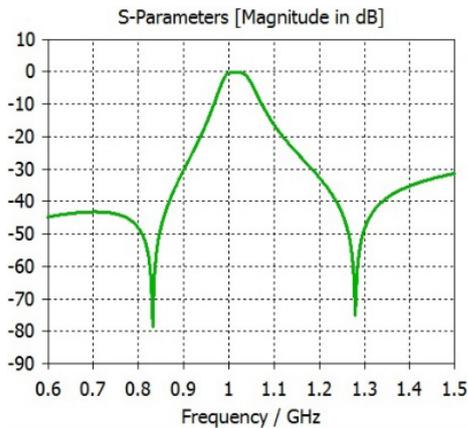
Для расчета параметров ППФ с повышенным уровнем пропускаемой СВЧ-мощности ранее разработанная и приведенная в [5] методика, основанная на принципе декомпозиции, не является корректной в связи с выполнением ККР и емкостей связи как единого конструктивного элемента, что приводит к сложности интерпретации подобной конструкции в виде эквивалентной схемы. Поэтому расчет и оптимизация параметров ППФ осуществлялись с помощью 3D электромагнитного моделирования в ПО CST Microwave Studio.

Технология изготовления ККР для ППФ с повышенным уровнем пропускаемой мощности содержит новый технологический процесс, связанный с формированием элементов связи непосредственно в его составе.

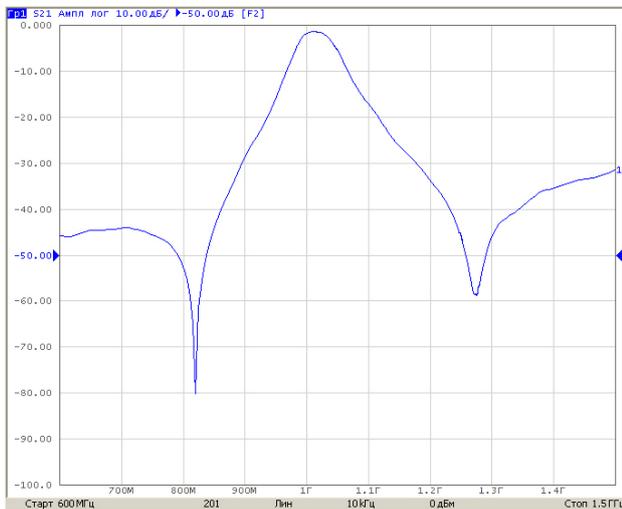
Необходимым условием изготовления образца ППФ, не требующего дополнительной регулировки и подстройки, является разработка технологического процесса прецизионного формирования



а)



б)



в)

Рис. 4. Общий вид СВЧ-блока передатчика системы телеметрии (а), расчетная (б) и измеренная (в) АЧХ ППФ: 1 – ППФ с повышенным уровнем пропускаемой СВЧ-мощности

на одной керамической заготовке ККР с заданной геометрической длиной и элементов связи между ККР и ККР с внешними устройствами.

Рассматривались два вида технологии изготовления ККР:

- нанесение на изготовленную керамическую заготовку ККР с помощью трафаретов с топологией металлизации внешних боковых поверхностей

ККР, серебрясодержащей пасты и последующее вжигание ее в керамику;

- формирование ККР с элементами связи путем удаления с поверхностью ККР, имеющего большую длину, лишней металлизации.

Первый вид технологии – толстопленочная технология, не позволил обеспечить требуемую точность геометрических размеров ККР и элементов связи, при его использовании необходимо введение в ППФ дополнительных элементов подстройки.

Второй вид технологии, основанный на выжигании лишней металлизации на лазерном комплексе FMark 10/20 RL, дал положительные результаты.

Экспериментальные образцы ППФ, собранные на изготовленных по второй технологии ККР, не потребовали дополнительных подстроек.

Данная технология используется в настоящее время в качестве основной при изготовлении опытных образцов ККР для ППФ с повышенным уровнем пропускаемой СВЧ-мощности.

Примером практического применения подобного ППФ в аппаратуре НИИИС является разработка передатчика системы телеметрии, установленного на летательном аппарате. Необходимость применения ППФ на выходе данного передатчика обусловлена требованиями обеспечения ЭМС с приемной аппаратурой, размещенной на этом же летательном аппарате.

Основными техническими требованиями к ППФ передатчика являются: уровень пропускаемой СВЧ-мощности не менее 10 Вт, малые габариты и масса, стойкость к механическим и климатическим воздействиям.

На рис. 4 показан общий вид СВЧ-блока передатчика системы телеметрии и приведены расчетная в ПО CST Microwave Studio и измеренная АЧХ выходного ППФ с повышенным уровнем пропускаемой СВЧ-мощности.

Следует отметить, что в широком диапазоне частот АЧХ типового ППФ на ККР имеет «паразитные» полосы пропускания вблизи нечетных кратных значений его центральной частоты (рис. 6, 2). Данный эффект связан с расстановкой собственных (резонансных) частот ККР.

Внешний вид ППФ разработки НИИИС с отсутствием «паразитных» полос пропускания вблизи гармоник основного сигнала приведен на рис. 5. Данный ППФ построен на основе колебательной системы с неэквидистантным расположением собственных частот на частотной оси в виде составного ККР (СКР).

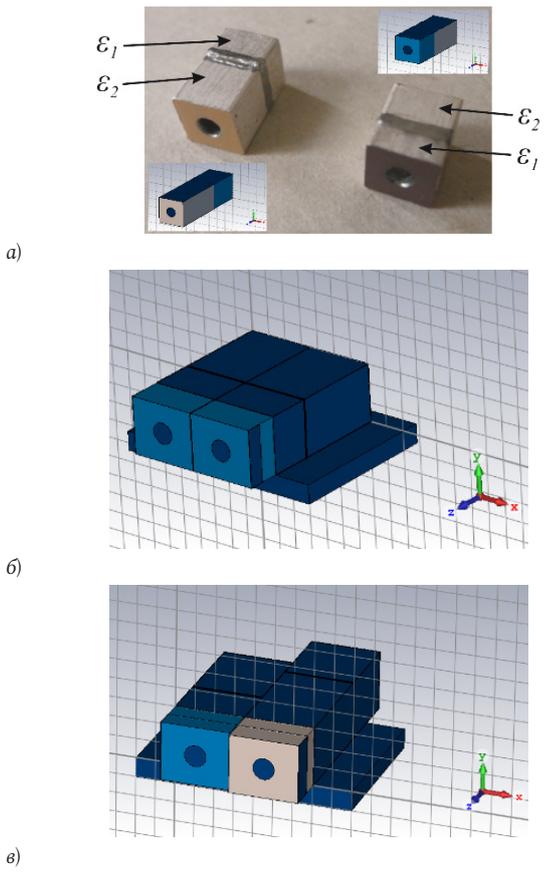


Рис. 5. Внешний вид СКР (а) и ППФ на основе СКР (б, в)

На рис. 6 показана расстановка собственных частот СКР, приведенных на рис. 5, а, с $\epsilon_1 = 100$ (В100), $\epsilon_2 = 40$ (ТЛ/0), и АЧХ двухрезонаторных ППФ на СКР, выполненных на одинаковых (рис. 5, б) и различных резонаторах (рис. 5, в).

Конструктивно СКР выполнен из двух отрезков коаксиальных линий (рис. 5), из которых один короткозамкнут, с одинаковыми поперечными размерами и разными волновыми сопротивлениями за счет использования керамических материалов с разными диэлектрическими проницаемостями [7].

Конструкция ППФ на СКР может быть аналогична конструкции ППФ на ККР с согласующей микроплатой, приведенной на рис. 1 [8]. При наличии повышенных требований к уровню пропускаемой СВЧ-мощности, ППФ на СКР (рис. 5, б, рис. 5, в) может быть построен на основе конструкции, показанной на рис. 3.

На рис. 6 можно видеть, что АЧХ ППФ на СКР не имеет паразитной полосы пропускания на утроенной центральной частоте ППФ.

Таким образом, использование рассмотренных СКР позволяет расширить возможности применения ККР в приемной и передающей бортовой радиоаппаратуре при решении задачи фильтрации гармоник основного сигнала.

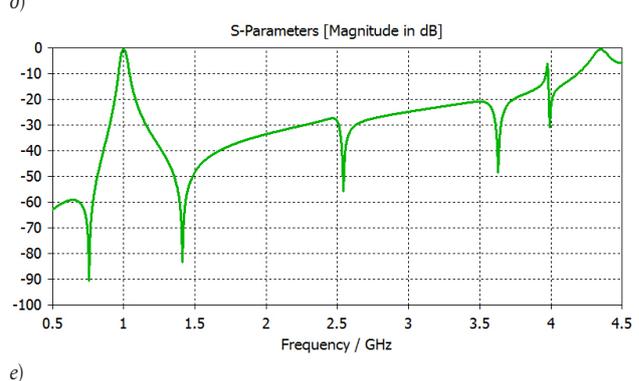
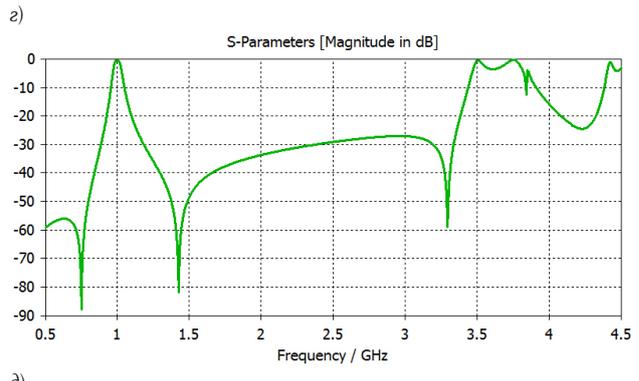
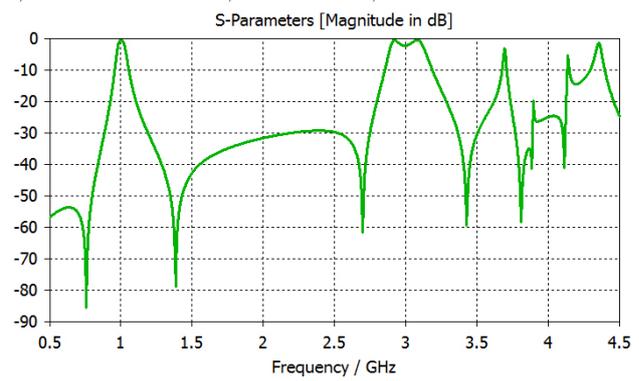
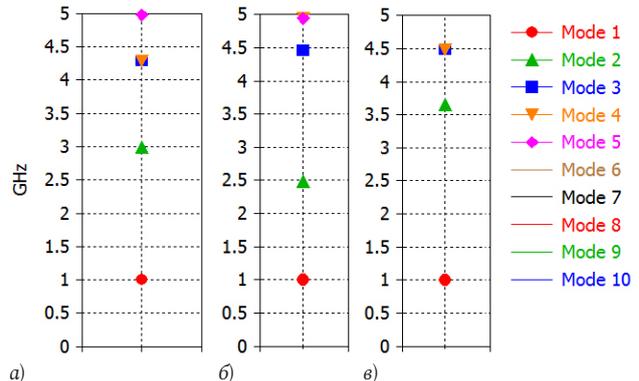


Рис. 6. Расстановка собственных частот ККР (а) и СКР (б, в), АЧХ ППФ на ККР (в) и СКР (д, е)

Заключение

Представленные ППФ на ККР, разработанные и изготовленные в НИИИС, показали высокий уровень проектирования и технологии, достигнутые на данном предприятии. Технологическая независимость НИИИС в области создания ППФ на

ККР с требуемыми характеристиками позволила изменить функциональное построение разрабатываемых КВЧ-приемных устройств, перейдя от двух преобразований частоты к одному, с обеспечением селекции сигнала в узкой полосе на СВЧ промежуточной частоте.

Создание ППФ на ККР с повышенными уровнем пропускаемой СВЧ-мощности и ослаблением на заданных частотах является актуальной задачей не только для приборов, разрабатываемых в НИИИС. Подобные ППФ могут найти более широкое применение, например в диплексерах базовых станций сотовой связи и ретрансляторов ра-

диорелейных линий связи, составив конкуренцию используемым в настоящее время в этой аппаратуре ППФ на диэлектрических резонаторах.

Дальнейшее совершенствование методов проектирования ППФ на ККР должно быть направлено на создание новых конструкций и их моделей, позволяющих управлять положением полюсов затухания АЧХ независимо от других характеристик ППФ. При этом развитие технологического обеспечения подобных работ должно быть направлено на расширение видов технологических операций и повышение точности их проведения.

Список литературы

1. Принципы построения и конструктивно-технологические особенности узкополосных полосно-пропускающих СВЧ-фильтров на коаксиальных керамических резонаторах / В.А. Бажилов [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. 2018. № 2. С. 9–16.
2. Применение методов моделирования в разработке многоканального анализатора спектра одиночных СШП-сигналов / А.В. Кашин [и др.] // Атомный проект. 2014. № 19. С. 68–70.
3. Самолетный радиолокационный измерительный комплекс КВЧ-диапазона / Н.И. Дмитриев [и др.] // Радиопромышленность. 2008. Вып. 2. С. 3–9.
4. Седаков А.Ю. Антенны и функциональные узлы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Методы расчета и технология изготовления. М.: Радиотехника, 2011. 112 с.
5. Седаков А.Ю. Математическое моделирование в проектировании и технологии фильтров СВЧ на коаксиальных керамических резонаторах // Антенны. 2016. Вып. 1 (221). С. 8–17.
6. Патент 2619363 РФ. Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр / Шишкин Д.Р., Кунилов А.Л., Балобанов Е.С., Ивойлова М.М. Приоритет от 18.07.2016.
7. Патент 2597952 РФ. Колебательная система на основе коаксиального керамического резонатора / Козлов В.А., Кунилов А.Л., Ивойлова М.М. Приоритет от 02.06.2015.
8. Козлов В.А. Математическая модель составного коаксиального керамического резонатора и ее применение в проектировании полосно-пропускающих фильтров СВЧ-диапазона // Антенны. 2016. Вып. 1 (221). С. 18–23.

References

1. Bazhilov V.A. et al. Principles of construction and structural and technological features of the narrowband bandpass microwave filters coaxial ceramic resonators. *Proektirovanie i tehnologija elektronnyh sredstv*, 2018, no. 2, pp. 9–16. [In Russian].
2. Kashin A.V. et al. The use of simulation methods in the development of multi-channel spectrum analyzer single UWB signals. *Atomnyj projekt*, 2014, no. 19, pp. 68–70. [In Russian].
3. Dmitriev N.I. et al. Aircraft radar measuring complex EHF. *Radiopromyshlennost'*, 2008, no. 2, pp. 3–9. [In Russian].
4. Sedakov A.Ju. *Antennas and Functional Units of Microwave and EHF Bands. Methods of Calculation and Manufacturing Techniques*. Moscow: Radiotekhnika, 2011. 112 p. [In Russian].
5. Sedakov A.Ju. Mathematical modeling in the design of microwave filters and technology to coaxial ceramic resonators. *Antenny*, 2016, no. 1 (221), pp. 8–17. [In Russian].
6. Patent 2619363 Russian Federation. *Bandpass microwave filter* / Shishkin D.R., Kunilov A.L., Balobanov E.S., Ivojlava M.M. Priority from 18.07.2016. [In Russian].
7. Patent 2597952 Russian Federation. *Oscillating system based on coaxial resonator* / Kozlov V.A., Kunilov A.L., Ivojlava M.M. Priority from 02.06.2015. [In Russian].
8. Kozlov V.A. A mathematical model of a composite coaxial resonator and its application in the design of bandpass filters microwave. *Antenny*, 2016, no. 1 (221), pp. 18–23. [In Russian].

Current state and development prospects of design and technology of ceramic filters for on-board microwave equipment

V.A. Kozlov, A.L. Kunilov, M.M. Ivoylova

Branch of RFNC-ARIEP «RIMS named after Yu.E. Sedakov»
47, Tropinin Street
Nizhny Novgorod, 603137, Russian Federation

The article considers the main design and technology issues of ceramic filters for on-board receiving and transmitting microwave equipment on the example of the development of the branch of RFNC-ARIEP «RIMS named after Yu.E. Sedakov». The types of band-pass filters based on coaxial ceramic resonators created in recent years here are presented. The features of their designs and technology in the manufacture on the basis of RIMS are considered, including if it is necessary to manufacture in a short time a limited number of coaxial ceramic resonators of band-pass filters of arbitrary shape and size. The results of the current developments of band-pass filters, planned for use in the advanced equipment are presented.

Keywords: bandpass filters, coaxial ceramic resonators, microwave receivers and transmitters.

Козлов Валерий Александрович, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского отдела Филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова».

Область научных интересов: прикладная электродинамика, техника СВЧ, приемопередающие устройства СВЧ- и КВЧ-диапазонов.

E-mail: vkozlov@niiis.nnov.ru

Кунилов Анатолий Львович, ведущий инженер-исследователь Филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова».

Область научных интересов: радиолокация, приемопередающие устройства СВЧ- и КВЧ-диапазонов.

E-mail: vkozlov@niiis.nnov.ru

Ивойлова Мария Михайловна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова».

Область научных интересов: распространение радиоволн, моделирование СВЧ-устройств.

E-mail: vkozlov@niiis.nnov.ru