

УДК 621.372(.41)

DOI 10.53403/9785951505170\_2021\_26\_2\_354

# **Принципы построения и конструктивно- технологические особенности узкополосных полосно-пропускающих СВЧ фильтров на коаксиальных керамических резонаторах**

*Рассмотрены основные типы СВЧ полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на коаксиальных керамических резонаторах (ККР), их основные характеристики, особенности конструкции и технологии изготовления.*

**В. А. Бажиллов\*, Е. С. Балобанов\*,  
М. М. Ивойлова\*, В. А. Козлов\*,  
А. Л. Кунилов\*, Д. Р. Шишкин\***

## *Введение*

Проектирование современной бортовой приемной и передающей аппаратуры дециметрового и нижней части сантиметрового диапазона длин волн требует применения малогабаритных узкополосных ППФ с высокими избирательными характеристиками и температурной стабильностью. Оптимальный вариант построения таких фильтров основан на использовании малогабаритных колебательных систем, изготовленных из высокодобротных термостабильных керамических материалов.

В настоящей работе рассмотрены наиболее распространенные типы современных узкополосных СВЧ ППФ на ККР основных отечественных и зарубежных производителей, приведены сравнительный анализ их основных характеристик, особенности конструкции и технологии изго-

---

\* Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород.

© Проектирование и технология электронных средств. 2018. № 2. С. 9–16.

товления, а также перспективные конструкции ППФ на ККР, разработанные в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ – Научно-исследовательском институте измерительных систем им. Ю. Е. Седакова (НИИС, г. Н. Новгород).

### ***1. Коаксиальные керамические резонаторы. Особенности конструкции и технологии изготовления***

Конструктивно ККР представляет собой керамическую заготовку, ограниченную цилиндрической поверхностью круглого или прямоугольного сечения с круглым отверстием внутри, все поверхности которой, кроме одного торца, металлизированы, т. е. является короткозамкнутым с одного конца отрезком коаксиальной линии с диэлектрическим заполнением, имеющим длину, равную  $\lambda/4$  ( $\lambda$  – длина волны в диэлектрике). Основными типами отечественной микроволновой керамики, применяемой в серийном производстве ККР, являются В20 ( $\epsilon = 20$ ), В40 ( $\epsilon = 40$ ), В80 ( $\epsilon = 80$ ) и В100 ( $\epsilon = 100$ ), где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость. Значения основных характеристик ККР, изготавливаемых из данной керамики, приведены в работах [1, 2], внешний вид образцов ККР различного поперечного сечения представлен на рис. 1.

Основным способом серийного изготовления керамических заготовок, составляющих основу ККР, является полусухое прессование в пресс-форме с последующим обжигом. Другой способ изготовления ККР основан на методах механической обработки керамических заготовок [3]. На рис. 2 приведена схема двух технологических маршрутов изготовления ККР – методами полусухого прессования и механической обработки бруска заготовки.

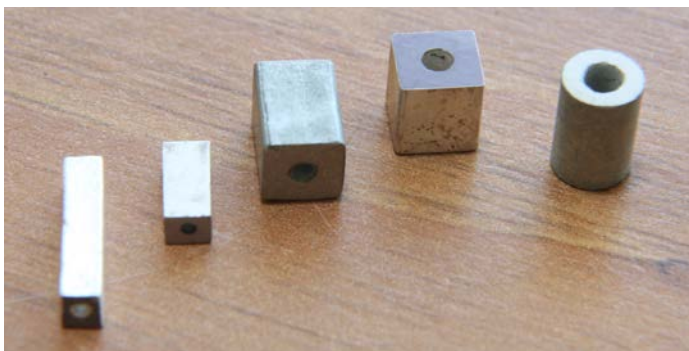


Рис. 1. Внешний вид образцов коаксиального керамического резонатора различного поперечного сечения

Технология полусухого прессования обеспечивает приемлемое качество поверхностей керамических заготовок резонаторов и не требует их дополнительной механической доработки. При изготовлении керамических заготовок резонаторов механическим способом формирование внешней поверхности осуществляется шлифованием абразивными кругами, отверстие изготавливается сверлением алмазными сверлами [3]. Как видно на рис. 2, метод механической обработки заготовок более трудоемкий, однако позволяет изготавливать ограниченное количество ККР любых размеров и сечений, что может быть необходимым при проведении НИОКР.



Рис. 2. Схема технологических маршрутов изготовления коаксиального керамического резонатора методами полусухого прессования (а) и механической обработки (б) бруска заготовки

## 2. Основные типы конструкций полосно-пропускающего фильтра на основе коаксиального керамического резонатора

### 2.1. Полосно-пропускающий фильтр на основе четвертьволновых коаксиальных керамических резонаторов с согласующей микроплатой

Конструктивно ППФ представляет собой набор четвертьволновых ККР, размещаемых рядом и гальванически соединенных между собой боковыми поверхностями. Между соседними резонаторами и между крайними резонаторами и внешними устройствами формируются емкостные связи, при этом у разных производителей различаются способы размещения ККР и формирования емкостных связей. Электрическая схема наиболее распространенного симметричного ППФ [4] с колебательной системой на основе ККР приведена на рис. 3.

Для данных ППФ потери на центральной частоте и крутизна скатов АЧХ определяются количеством резонаторов в фильтрах и их собственной добротностью. Основные методы расчета

параметров ППФ на ККР, в т. ч. с учетом технологии изготовления ККР методом механической обработки керамических заготовок, подробно рассмотрены в работах [3, 5–11].

Серийным производством ППФ на четвертьволновых ККР в настоящее время занимаются зарубежные компании LORCH MICROWAVE (США), K&L Microwave (США), Spectrum Microwave INC (Api technologies corp., США), Murata (Япония), Wever communication (Южная Корея), Mini-Circuits (США) (см. каталоги перечисленных фирм). Основными отечественными разработчиками и изготовителями таких ППФ являются FILter Innovations (г. Москва), ОАО «Транстрономика» (г. Санкт-Петербург), ЗАО «НПФ Микран» (г. Томск), НИИИС (г. Нижний Новгород) [12 (см. каталоги перечисленных фирм)]. Типовые характеристики узкополосных фильтров данной конструкции приведены в табл. 1.

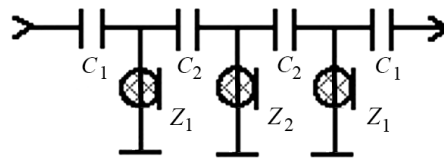


Рис. 3. Электрическая схема трехрезонаторного полосно-пропускающего фильтра на коаксиальном керамическом резонаторе:  $Z_1$  и  $Z_2$  – импедансы ККР,  $C_1$  – емкости конденсаторов связи между крайними ККР и внешними устройствами,  $C_2$  – емкости конденсаторов связи между смежными ККР

Таблица 1

Типовые характеристики узкополосных полосно-пропускающих фильтров на коаксиальных керамических резонаторах

Фирма-производитель	Номинальная частота $f_0$ , МГц	Минимальная полоса пропускания $\Delta f$ , %	Вносимое затухание, дБ	Затухание в полосе заграждения, дБ	Габариты при $f_0 \sim 1$ ГГц, мм	Температура, °С
LORCH MICROWAVE	400–5000	от 0,5 %	$\leq 8$	при $f = f_0 \pm 2\Delta f$ $\geq 30$	$5 \times 16 \times 18$	$-20 - +70$
K&L Microwave	270–3000	от 1 %	$\leq 2,5$	$\geq 30$	$5 \times 14 \times 24$	$-40 - +85$
Spectrum Microwave INC	400–6000	0,15–1,5 %	1,5–8	4–30	$3 \times 14 \times 10$	$-30 - +85$
Murata	600–3800	0,15–2,5 %	1–4,5	6–50	$4 \times 13,5 \times 10$	$-30 - +85$
Wever communication	300–5000	от 1,5 %	0,5–10	5–75	$5 \times 14 \times 18$	$-50 - +80$
ОАО «Транстрономика»	800–1500	$\sim 3,5$ %	$\leq 2,5$	при $f = f_0 \pm 3\Delta f$ $\geq 40$	$5 \times 14 \times 18,5$	$-60 - +60$
ЗАО «НПФ Микран»	300–2000	от 1 %	1–5	при $f = f_0 \pm 2\Delta f$ $\geq 20$	$5 \times 10 \times 15$	$-50 - +50$
НИИИС	400–3000	от 1 %	1–3	при $f = f_0 \pm 2\Delta f$ $\geq 20$	$6 \times 7,5 \times 18$	$-60 - +60$

Конструкция и внешний вид ППФ на ККР производства компании LORCH MICROWAVE приведены на рис. 4 [12]. Конструктивно данный фильтр представляет собой размещаемые на металлическом основании 1 четвертьволновые ККР 2 и закрепленную на них согласующую микро-

плату 3, на которой сформированы конденсаторы связи между смежными ККР и конденсаторы связи крайних ККР с внешними устройствами.

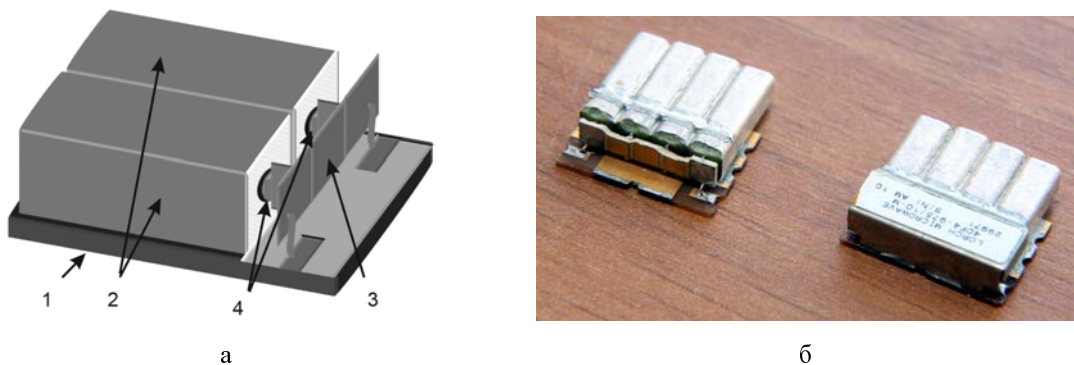


Рис. 4. Конструкция (а) и внешний вид (б) полосно-пропускающего фильтра на коаксиальном керамическом резонаторе фирмы LORCH MICROWAVE

Основным достоинством данного типа ППФ является возможность применения в одном изделии ККР из керамических материалов с различными электрофизическими параметрами, что расширяет возможности улучшения электрических характеристик ППФ.

Согласно данным сайта [12], уровень пропускаемой мощности таких ППФ не должен превышать 1 Вт. Данное ограничение обусловлено низким пробивным напряжением конденсаторов связи на согласующей микроплате, выполненных в виде зазоров между контактными площадками, к которым припаяны внутренние проводники ККР.

К особенностям конструкции ППФ следует отнести низкую стойкость к механическим воздействиям, обусловленную креплением согласующей микроплаты 3 (см. рис. 4) только на опорные стойки 4, вставленные в отверстия ККР и гальванически соединенные с их внутренними проводниками, без крепления этой согласующей микроплаты к основанию 1. При наличии механических вибраций согласующая микроплата 3 начинает колебаться, что может привести к обрыву полосковых выводов связи с внешними устройствами.

Таким образом, данные ППФ могут применяться в устройствах, к которым не предъявляются требования по механической прочности и большим уровням проходящей мощности сигналов.

Более совершенными являются ППФ разработки НИИИС, внешний вид которых приведен на рис. 5 [3] и 6 [13].

Образец ППФ, приведенный на рис. 5, а, представляет собой размещаемые на металлическом основании 1 четвертьволновые ККР квадратного сечения 2 и согласующую микроплату 3, на которой конденсаторы связи между смежными ККР и связи крайних из них с внешними устройствами выполнены в виде зазоров между контактными площадками, к которым припаяны внутренние проводники ККР.

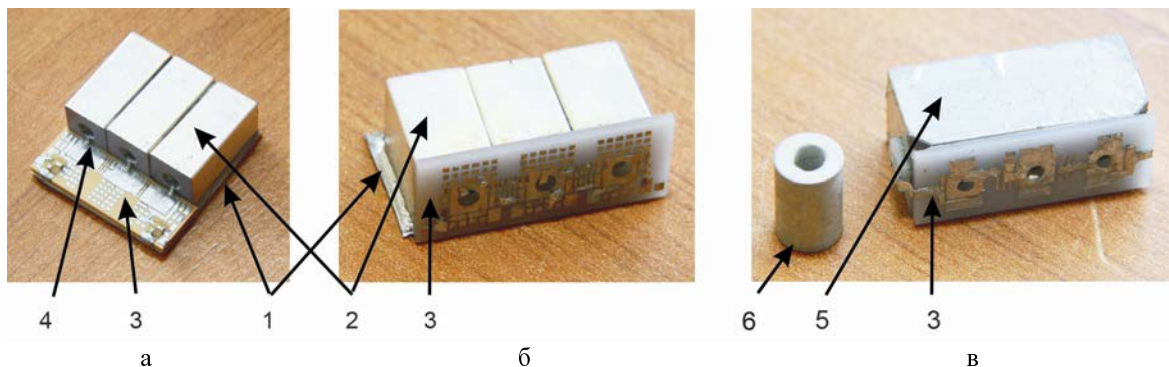


Рис. 5. Внешний вид полосно-пропускающего фильтра на коаксиальном керамическом резонаторе разработки НИИИС

Основными достоинствами ППФ, приведенных на рис. 5, *а*, являются:

- возможность улучшения электрических характеристик за счет применения в одном ППФ ККР, изготовленных из различных керамических материалов;
- удобство регулировки;
- стойкость к механическим воздействиям, обусловленная отсутствием навесных элементов в конструкции.

Максимальный уровень пропускаемой мощности ППФ также не превышает 1 Вт, что обусловлено низким пробивным напряжением конденсаторов связи на согласующей микроплате 3 (см. рис. 5).

Образец ППФ, показанный на рис. 5, *а*, имеет следующие особенности:

- наличие радиационных потерь, обусловленное излучением СВЧ мощности с открытого конца резонаторов 2 и ленточными перемычками 4, соединяющими внутренние проводники резонаторов 2 с контактными площадками на согласующей микроплате 3;
- большое количество комплектующих деталей.

На рис. 5, *б* приведен образец ППФ на ККР с вертикальным расположением согласующей микроплаты 3. Достоинствами ППФ с подобным размещением микроплаты являются:

- низкие потери в полосе пропускания, обусловленные пониженным уровнем излучения открытого конца резонатора и ленточных перемычек;
- лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с ППФ, приведенным на рис. 5, *а*.

На рис. 5, *в* приведен вариант исполнения ППФ с повышенными прочностными характеристиками, представляющий собой ППФ на ККР круглого сечения 6, которые размещаются в металлическом корпусе 5 с вертикально расположенной согласующей микроплатой 3 на его переднем торце.

Для исключения в ППФ на основе ККР «паразитных» полос пропускания вблизи нечетных кратных значений его центральной частоты в НИИИС была разработана колебательная система с неэквидистантным расположением собственных частот на частотной оси в виде составных коаксиальных керамических резонаторов (СКР) [14].

Конструктивно СКР выполнен в виде двух отрезков коаксиальных линий, из которых один короткозамкнутый, с равными внешними и внутренними диаметрами, но с разными волновыми сопротивлениями за счет использования керамических материалов с разными диэлектрическими проницаемостями.

Внешний вид СКР и ППФ на его основе показаны на рис. 6.

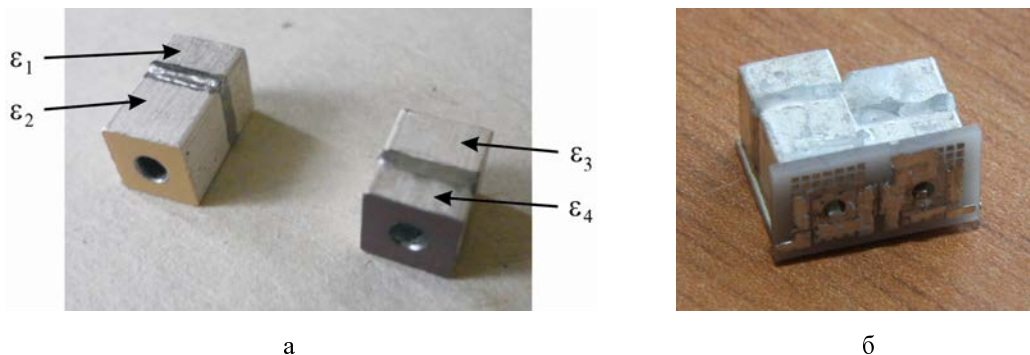


Рис. 6. Внешний вид СКР (а) и полосно-пропускающего фильтра на основе СКР (б)

Как видно на рис. 6, конструкция ППФ на основе СКР аналогична конструкции ППФ на основе ККР, приведенной на рис. 5, б.

Все рассмотренные варианты исполнения ППФ (см. рис. 4–6) могут применяться в устройствах с уровнем пропускаемой мощности сигналов не более 1 Вт.

## 2.2. Полосно-пропускающий фильтр на основе четвертьволновых коаксиальных керамических резонаторов без согласующей микроволновой платы

Конструкция и внешний вид ППФ на основе четвертьволновых ККР без согласующей микроволновой платы разработки НИИИС [16] приведены на рис. 7. Конструктивно данный ППФ представляет собой установленные на металлическое основание 1 и гальванически соединенные между собой боковыми поверхностями четвертьволновые резонаторы 2, изготовленные на основе коаксиальной керамической линии квадратного сечения. Каждый резонатор и конденсаторы связи его с другим резонатором или внешним устройством изготовлены как один конструктивный элемент. Конденсаторы связи отделены от резонатора зазором в металлизации внешней поверхности коаксиальной керамической линии 3, их обкладками являются внутренний проводник 4 и боковые поверхности отрезка коаксиальной керамической линии от зазора до открытого торца коаксиальной керамической линии 5, причем на горизонтальных поверхностях этого отрезка коаксиальной керамической линии отсутствует металлизация.



Рис. 7. Конструкция (а) и внешний вид (б) полосно-пропускающего фильтра с повышенным уровнем пропускаемой мощности (полукруглыми областями выделены места выборки металлизации при регулировке частоты и связей между резонаторами и внешними устройствами)

Формирование емкостей связи в виде керамических конденсаторов, обкладками которых являются боковые поверхности и внутренний проводник коаксиальной керамической линии, а изолятором – керамический материал коаксиальной линии, обеспечивает конденсаторам связи высокие значения напряжения пробоя.

Основными достоинствами ППФ данной конструкции являются:

- высокий уровень пропускаемой мощности;
- простота конструкции, высокая технологичность при изготовлении, сборке и регулировке, обусловленные малым количеством комплектующих деталей;
- высокая механическая прочность, обусловленная отсутствием навесных элементов в конструкции;
- низкие потери в полосе пропускания, обусловленные отсутствием излучения открытого конца резонатора и ленточных перемычек;
- высокие массогабаритные характеристики, обусловленные выполнением резонатора и конденсаторов связи в виде одной детали.

Данные ППФ могут применяться в устройствах, к которым предъявляются высокие требования по механической прочности и большим уровням проходящей мощности сигналов, например в выходных каскадах передатчиков.

При наличии требований к расстановке внеполосных частот пропускания такой ППФ может быть построен на основе СКР, показанных на рис. 6, б.

### 2.3. Полосно-пропускающий фильтр на основе керамических монолитных блоков

Отдельным направлением в проектировании узкополосных ППФ являются фильтры, построенные на основе керамических монолитных блоков (КМБ). КМБ представляет собой колебательную систему, эквивалентную установленным вплотную друг к другу четвертьволновым ККР без смежных проводящих стенок, как показано на рис. 8, а. Конструкция ППФ на КМБ приведена на рис. 8, б и представляет собой размещаемый на металлическом основании 1 керамический монолитный блок 2, при этом конденсаторы связи 3 выполнены непосредственно на открытом конце КМБ в виде зазоров между токопроводящими площадками, соединенными с его внутренними проводниками.

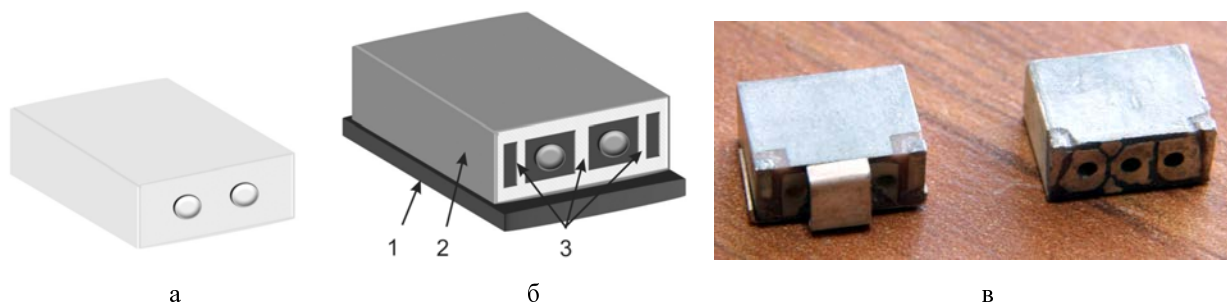


Рис. 8. Конструкция керамического монолитного блока (а), конструкция (б) и внешний вид (в) полосно-пропускающего фильтра на керамическом монолитном блоке



Производством ППФ на КМБ в настоящее время занимаются ОАО «НИИ «Феррит-Домен» (г. Санкт-Петербург), ОАО «RETEC-KORUS Ltd», АО «СКТБ РТ» (В. Новгород), а также Spectrum Microwave INC (Api technologies corp., США), Murata (Япония), Epcos (Германия), UBE (Япония) и Token (Тайвань) (см. каталоги перечисленных фирм). Типовые характеристики узкополосных фильтров данной конструкции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Типовые характеристики узкополосных ППФ на КМБ

Фирма-производитель	Номинальная частота $f_0$ , МГц	Минимальная полоса пропускания $\Delta f$ , %	Вносимое затухание, дБ	Затухание в полосе заграждения, дБ	Габариты при $f_0 \sim 1$ ГГц, мм	Температура, °С
Spectrum Microwave INC	300–5800	0,1–1 %	1–3	3–40	8×10×34	–30 – +85
Murata	800–6000	0,1–1,5 %	1,5–5,5	6,5–60	3×8×6	–30 – +85
Epcos	800–6000	~2,5 %	≤2,5	≥30	3×6,5×8	–20 – +80
ОАО «НИИ «Феррит-Домен»	400–16000	от 0,7 %	0,6–8	20–70	8×13,5×15 2×2×4	–60 – +70
ОАО «RETEC-KORUS Ltd»	1000–6000	от 1 %	≤3	≥30	3,5×7,5×7	–40 – +85
АО «СКТБ РТ»	1000–18000	от 2 %	≤4	≥30	5×4×15	–60 – +85

Основными достоинствами ППФ являются:

- высокая стойкость к механическим воздействиям вследствие моноблочного исполнения;
- малое количество деталей, обеспечивающее простоту конструкции и, как следствие, высокую технологичность изготовления и низкую стоимость при изготовлении в серийном производстве;
- малые габариты и масса.

Согласно данным сайта [16], уровень пропускаемой мощности таких ППФ не превышает 1 Вт, что обусловлено низким пробивным напряжением конденсаторов связи, выполненных в виде зазоров между токопроводящими площадками.

Данный тип ППФ имеет следующие особенности:

- высокие требования к технологической обработке техпроцессов изготовления керамических монолитных блоков в условиях массового производства, обусловленные необходимостью получения высокой однородности по объему электрофизических параметров керамического материала, из которого изготавливается КМБ;
- невозможность применения в одном устройстве керамических материалов с различной диэлектрической проницаемостью, что ограничивает возможности улучшения его электрических характеристик, обусловленное моноблочностью конструкции КМБ.

Таким образом, данные ППФ обладают высокой механической прочностью, массогабаритными характеристиками и могут применяться в устройствах, к которым не предъявляются требования по пропусканию сигналов с повышенным уровнем мощности.

## **Заключение**

Анализ принципов построения, конструктивно-технологических особенностей и номенклатуры современных и перспективных узкополосных ППФ на ККР показывает, что несмотря на существование ППФ на иных физических принципах – на поверхностных и объемных акустических волнах, магнитостатических волнах на основе ККР будут востребованы вследствие простоты изготовления, низкой стоимости исходных материалов, возможности проектирования по стандартным методикам. Тип применяемых ППФ должен определяться с учетом их использования в конкретных радиотехнических устройствах.

## **Список литературы**

1. ВЧ- и СВЧ-керамические материалы и микроволновые элементы: Каталог продукции. С.-Петербург: ООО «Керамика», 2004.
2. Ненашева Е. А. Состояние дел в области разработок и производства микроволновых керамических материалов и элементов СВЧ-техники // Труды межд. научно-практической конф. «Функциональная керамика 2006». Н. Новгород: НРЦ «Наноиндустрия», 2006. С. 78–82.
3. Антенны и функциональные узлы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Методы расчета и технология изготовления / Под ред. А. Ю. Седакова. М.: Радиотехника, 2011.
4. Кугушев А. М., Голубева Н. С. Основы радиоэлектроники. М.: Энергия, 1969.
5. Козлов В. А., Светлаков Ю. А., Шишкин Д. Р., Ивойлова М. М. Математическое моделирование основных этапов технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых деталей СВЧ- и КВЧ-устройств // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 3. С. 76–80.
6. Ивойлова М. М. Модель коаксиального керамического резонатора с учетом шероховатости токоведущих поверхностей // Труды НГТУ. 2015. № 2. С. 29–39.
7. Седаков А. Ю., Светлаков Ю. А., Ивойлова М. М. Математическое моделирование в проектировании и технологии фильтров СВЧ на коаксиальных керамических резонаторах // Антенны. 2016. Вып. 1(221). С. 8–17.
8. Козлов В. А., Ивойлова М. М. Влияние технологических разбросов геометрических размеров и диэлектрической проницаемости коаксиальных керамических резонаторов на параметры полосно-пропускающих СВЧ-фильтров // Сб. мат. XXI Межд. научно-технической конф. «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2015. С. 81–82.
9. Маттей Г. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1970.
10. Беляков А. Ю., Петров Е. В., Попов В. В., Штейнгарт А. П. Расчет СВЧ полосовых фильтров с частотными характеристиками специального вида // Вестник НовГУ. 2015. № 8(91). С. 45–51.

11. Беляков А. Ю., Петров Е. В., Попов В. В., Штейнгарт А. П. Методика проектирования металлокерамических фильтров СВЧ с применением программ 3d-моделирования // Там же. 2014. № 81. С. 26–30.

12. Официальный сайт LORCH MICROWAVE [Электронный ресурс]. – Керамические фильтры типа 4DF4-975/10-М. – Каталог. – <http://www.lorch.com>.

13. Козлов В. А., Кунилов А. Л., Ивойлова М. М. Математическая модель составного коаксиального керамического резонатора и ее применение в проектировании полосно-пропускающих фильтров СВЧ-диапазона // Антенны. 2016. Вып. 1(221). С. 18–23.

14. Пат. 2597952 РФ. Колебательная система на основе коаксиального керамического резонатора / В. А. Козлов, А. Л. Кунилов, М. М. Ивойлова // Открытия. Изобретения. 2016. № 26.

15. Пат. 2619363 РФ. Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр / Д. Р. Шишкин, А. Л. Кунилов, Е. С. Балобанов, М. М. Ивойлова // Там же. 2017. № 14.

16. Официальный сайт ОАО «Транстроника» [Электронный ресурс]. – Керамические фильтры типа ФС(3)-975/20. УЖМК.434834.003ТУ. – Каталог. – <http://www.transtronics.ru>.

## **Creation Principles and Constructive and Technology Features of the Narrow-Band Band-Pass Microwave Filters on the Basis of Coaxial Ceramic Resonators**

**V. A. Bazhilov, E. S. Balobanov, M. M. Ivoylova, V. A. Kozlov, A. L. Kunilov, D. R. Shishkin**

*Considered the main types of band-pass microwave filters on the basis of coaxial ceramic resonators, their basic characteristics, features of a design and manufacturing techniques.*