

УДК 621.372.852.1

МЕТОДИКА ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Д.А. КОВАЛЕВИЧ, Д.В. КАЛИНОВСКИЙ

НП ООО «ОКБ ТСП»

(г. Минск, Беларусь)

E-mail: kovalevichda@okbtsp.com, kalinovskidv@okbtsp.com

Аннотация. Предложена классификация способов реализации пассивных электрических фильтров, применяемых в радиоэлектронике. Приведен сравнительный анализ технических характеристик фильтров различной конструкции. Предложена методика выбора оптимальной технологии построения электрического фильтра на основании условий его применения.

Abstract: A classification of methods for implementing passive electrical filters used in radio electronics is proposed. A comparative analysis of the technical characteristics of filters of various designs is provided. A methodology for selecting the optimal electrical filter design technology based on the conditions of its application is proposed.

Введение

В научной и технической литературе подробно описаны как теоретические основы построения электрических фильтров, так и готовые инженерные формулы, необходимые для их проектирования. Однако большое количество вариантов их конструкции требуют наличия методики выбора наиболее подходящей реализации в зависимости от условий их применения. В литературе [1] был предложен оригинальный удобный и наглядный способ представления основных параметров фильтров различной конструкции в координатах «частота-полоса» представленный на рис. 1. Он позволял в удобной форме произвести выбор оптимальной технологии производства проектируемого фильтра. К недостаткам предложенного подхода можно отнести отсутствие иных не менее важных параметров, таких как максимальная допустимая мощность подводимого сигнала, коэффициент прямоугольности, типовые потери, габаритные размеры и др. Помимо этого, в [1] были упомянуты далеко не все возможные технологии производства электрических фильтров, известные на момент написания работы. На сегодняшний день вариантов реализации пассивных электрических фильтров стало еще больше, что требует учета при выборе того или иного решения в процессе инженерной деятельности.

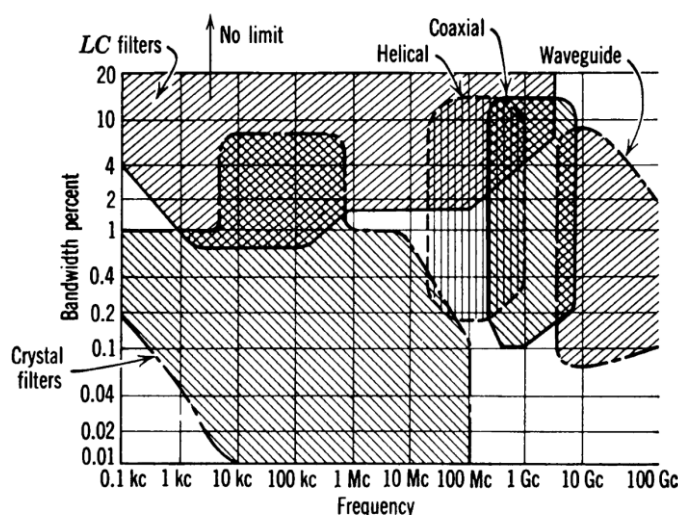


Рис. 1 Параметры фильтров различной конструкции из [1]

Технологии производства электрических фильтров

Технологии, упомянутые в [1], достаточно известны и не утратили своей актуальности и сегодня. К ним относятся:

- фильтры на сосредоточенных элементах (LC-фильтры);
- кварцевые фильтры;
- коаксиальные фильтры;
- спиральные фильтры;
- волноводные фильтры.

Стоит отметить, что некоторые технологии производства фильтров не были отражены, а именно:

- керамические фильтры;
- фильтры на элементах с распределенными параметрами (в том числе микрополосковые);
- электромеханические фильтры.

Все упомянутые конструкции фильтров хорошо известны и в достаточной степени описаны в литературе [2, 3, 4]. Однако, за последнее время появилось большое количество новых подходов к производству электрических фильтров:

- фильтры с использованием акустических волн;
- диэлектрические фильтры;
- многослойные керамические фильтры;
- микроволновые интегральные фильтры;
- интегрированные в подложку волноводные фильтры;
- фильтры на железо-иттриевом гранате;
- гибридные фильтры на элементах с распределенными параметрами.

В основе работы фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ, в иностранной литературе SAW от Surface Acoustic Wave) лежит преобразование электромагнитного колебания в акустическое. Проигрывая в добротности кварцевым фильтрам и не отличаясь высокой допустимой мощностью проходящего сигнала, эти фильтры получили широкое распространение благодаря небольшим габаритам и низкой стоимости серийно выпускаемых образцов. Технология производства ПАВ-фильтров достаточно проста и имеет высокую повторяемость, однако с повышением частоты возрастают требования к разрешающей способности фотолитографии и обработке поверхности пьезоэлектрика, что приводит к ограничению рабочей частоты на уровне 3 ГГц [5].

Принцип работы фильтров на объемных акустических волнах (ОАВ, в иностранной литературе BAW от Bulk Acoustic Wave) основан на возбуждении продольной объемной акустической волны в тонкой пьезокристаллической пленке. На базе этой технологии теоретически могут быть реализованы полосовые фильтры, работающие в диапазоне частот до 20 ГГц, но широкое распространение в микроэлектронике получили образцы с частотами пропускания до 6 ГГц [6].

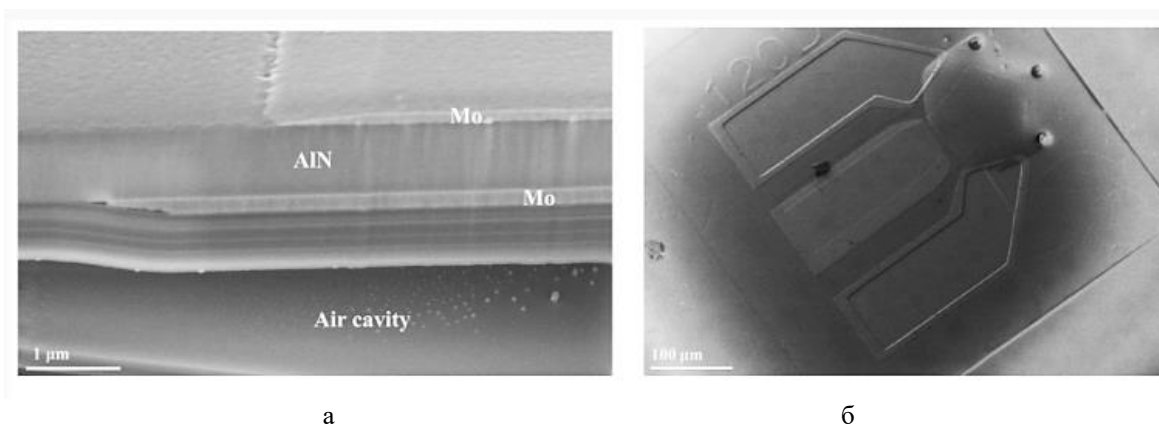


Рис. 2. Фото BAW-фильтра с полосой пропускания 160 МГц на частоте 3,4 ГГц полученное электронным микроскопом: *а* – фото слоев материала в активной части фильтра; *б* – общий вид фильтра

Микроволновые интегральные фильтры (в иностранной литературе MMIC от Monolithic Microwave Integrated Circuit) это компактные частотно-избирательные компоненты, выполненные на единой полупроводниковой подложке. В отличие от традиционных фильтров на дискретных элементах, MMIC-фильтры объединяют резонаторы и другие элементы схемы непосредственно в кристалле, что позволяет достичь миниатюрных размеров и высокой добротности за счёт снижения влияния паразитных характеристик [7]. Пример топологии приведен на рис. 3.

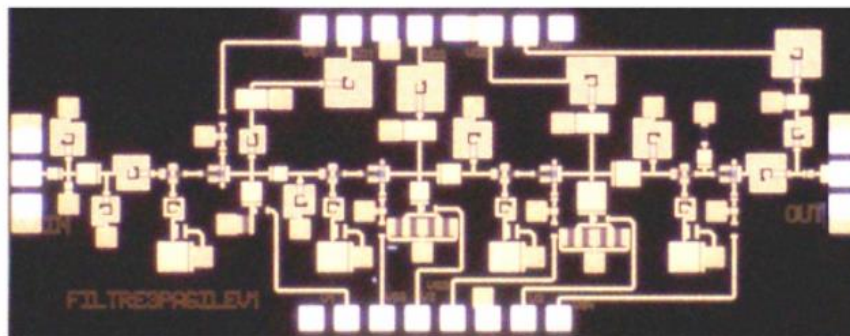


Рис. 3. Фотография частотно-перестраиваемого 3-полюсного полосового активного фильтра MMIC, выполненного по технологии GaAs P-HEMT. Размер: $(3,5 \times 1,3)$ мм²

Интегрированные в подложку волноводные фильтры (в иностранной литературе SIW от Substrate Integrated Waveguide) создаются во внутренних слоях печатных плат за счет полостей, ограниченных металлизацией верхнего и нижнего прилегающих слоев по вертикали и рядами металлизированных отверстий либо металлизированным торцом слоя по горизонтали [8]. Обладая компактными размерами и невысокой стоимостью производства SIW-фильтры превосходят по параметрам микрополосковые. Они не способны пропускать такие же высокие уровни мощности, как полые волноводы.

Диэлектрические фильтры строятся на базе диэлектрических резонаторов с высокой диэлектрической проницаемостью, что позволяет существенно снизить размеры за счет замедления электромагнитной волны в диэлектрике [9]. Существующие в настоящее время способы возбуждения резонаторов не позволяют получить внешнюю добротность менее 10, что соответствует максимальной относительной полосе пропускания фильтра не более 5%.

Многослойные керамические фильтры (в иностранной литературе LTCC от Low Temperature Co-fired Ceramic) изготавливаются путём спекания слоёв керамики с нанесёнными на них металлическими проводниками при относительно низкой температуре. Трёхмерная структура позволяет создавать фильтры значительно меньшего размера по сравнению с микрополосковыми. LTCC-фильтры обладают низкими вносимыми потерями (часто менее 1 дБ), высокой добротностью и низкой стоимостью производства [10]. При использовании технологии HTCC (в иностранной литературе HTCC от High Temperature Co-fired Ceramic) применяются материалы, которые подвергаются совместному обжигу при температуре выше 1600 °С. Фильтры, изготовленные по такой технологии значительно дороже, но могут использоваться в условиях воздействия экстремальных температур свыше 1000 °С. В данной работе HTCC фильтры не рассматриваются, ввиду отсутствия информации об их параметрах в открытых источниках.

Фильтры на сферах из иттриево-железистого граната (ЖИГ, в иностранной литературе YIG от Yttrium Iron Garnet sphere) обладают высокой добротностью от 100 до 200. Сфера, изготовленная из монокристалла синтетического иттриевого железистого граната, действует как резонатор. Электромагнитное поле изменяет резонансную частоту сферы и, следовательно, частоту, которую она пропускает. Преимущество такого типа фильтра заключается в том, что гранат можно настраивать в очень широком диапазоне частот, изменяя силу магнитного поля. ЖИГ-фильтр можно мгновенно перестраивать в пределах нескольких октав простым изменением тока управляющего магнита [12].

Гибридные фильтры совмещают в своей конструкции компоненты с распределёнными и сосредоточенными параметрами. К ним относится достаточно широкий класс готовых устройств, совмещающий в себе комбинации вышеупомянутых технологий в одном законченном изделии [11].

Мелкосерийное изготовление фильтров применяется только для решения специфических задач, где стандартные компоненты неприменимы. К этой категории относятся сложные волноводные структуры для космических аппаратов, специализированные SIW-фильтры, интегрированные непосредственно в топологию многослойных печатных плат, а также мощные объёмные резонаторы.

В сегменте массового производства фильтров в том числе ПАВ и LTCC технологий широко представлены японские и американские корпорации, такие как Murata, TDK, Skyworks и Qorvo, обеспечивающие компонентами всю сферу мобильной связи и потребительской электроники. СВЧ-диапазон и прецизионные LC-фильтры представлены такими брендами, как Mini-Circuits, K&L Microwave и Temwell, предлагающими широкий спектр готовых модулей для радиоэлектронной промышленности. На территории СНГ ключевыми центрами разработки фильтров являются АО «ОНИИП», ООО «БУТИС» и НПФ «Микран», в которых ведётся разработка и производство высоконадежных компонентов для профессиональной радиосвязи и радиолокации.

«ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2026»

Международная научно-техническая конференция, 9-10 июня 2026 г., Минск, Республика Беларусь

Сравнительные характеристики фильтров, выполненных с использованием различных технологий, сведены в табл. 1, 2 и 3, для наглядности на рис. 4 приведён график с диапазонами частот и полосами пропускания фильтров.

Таблица 1. Сравнительные характеристики электрических фильтров (начало)

№	Тип	Диапазон частот, МГц	Макс. полоса (*)	Коэффициент прямоугольности	Потери, дБ	Добротность резонат.
1	На сосредоточенных элементах (LC)	0 - 500	100%	3.0 - 5.0	1 - 3	30-150
2	Волноводные металлические (waveguide)	3K - 110K	15%	1.2 - 2.5	0.05 - 0.5	2000-10000
3	Волноводные интегрированные в подложку (SIW)	8K - 110K		2.0 - 3.5		
4	Диэлектрические монолитные	500 - 30K	5%	1.3 - 2.2	0.5 - 1.5	1000-5000
5	Многослойные керамические (LTCC)	80 - 10K	100%	1.2 - 1.5		50 - 150
6	Кварцевые дискретные	2 - 25	5 кГц	1.1 - 1.5	1 - 4	10000-150000
7	Кварцевые монокристалльные	10 - 100	100 кГц	1.1 - 1.5		
8	Керамические (ceramic)	0.25 - 11	300 кГц	2.0 - 3.5	2 - 4	100-500
9	Коаксиальные воздушные	400 - 20K	15%	1.8 - 2.8	0.2 - 1	1000-3000
10	Микроволновые интегральные (MMIC)	1K - 100K	5%	1.1 - 1.5	1.5 - 4	100-800
11	Микрополосковые	500 - 100K	100%	3.0 - 5.0	1 - 5	50-250
12	На элементах с распредел. параметрами	60 - 1K	100%	1.8 - 2.5	0.1 - 1	
13	На объёмные акустических волнах (BAW)	1.5K - 20K	5%	1.1 - 1.3	1 - 2.5	1000-2500

«ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2026»

Международная научно-техническая конференция, 9-10 июня 2026 г., Минск, Республика Беларусь

14	На поверхностных акустических волнах (SAW)	30 - 3К	10%	1.2 - 1.5	2 - 10	300-1000
15	Спиральные (Helical)	30 - 3К	15%	2.0 - 3.0	0.5 - 2	500-1500
16	Электромеханические	0.05 - 0.5	50 кГц	1.4 - 2.0	3 - 8	1000-10000
17	Гибридные фильтры	0.01 - 14К	100%	1.1 - 3.0	0.5 - 2	500-5000
18	На основе железо-иттриевого граната (YIG)	350 - 110К	1%	2.5 - 5	1.5 - 5.5	3000-10000

Примечание: * - возможность реализации ФНЧ и ФВЧ соответствует полосе 100%, остальные полосы – только ПФ.

Таблица 2. Сравнительные характеристики электрических фильтров (продолжение)

№	Макс. мощн., Вт	Импеданс, Ом	Темп. стаб., ppm/°C	Перестройка ⁽³⁾	Лин. разм. ⁽⁴⁾
1	100 - 10К ⁽¹⁾	произв.	50 - 500	эл.	мощн.
2	более 100К	50 - 500 ⁽²⁾	15 - 25	мех.	част.
3	10	120 - 200 ⁽²⁾	30 - 100	нет	
4	20	50 / 75	2 - 30	нет	5...30 мм
5				нет	2...5 мм
6	0,01	500 - 5К	0.5 - 2.0	эл.	кол-во резонат.
7				нет	5...20 мм
8		300 - 1.5К	50 - 200	нет	3...10 мм
9	5К	50 / 75	20 - 40	мех.	мощн. и част.
10	0,5	50	10 - 50	эл.	3...5 мм
11	1	50 / 75	50 - 150	нет	част.
12	2К	50 / 75		мех., эл.	мощн. и част.
13	5	50	2 - 20	нет	2...3 мм
14	1	50 - 200	30 - 50	нет	2...10 мм
15	100	50 / 75	30 - 80	мех.	мощн.
16	0,01	1К - 10К	10 - 50	нет	50...100 мм

17	250	50 / 75	2 - 20	мех., эл.	мощн. и част.
18	2	50	250 - 360	эл.	25...50 мм

Примечания:

- 1 – уменьшается с увеличением частоты;
- 2 – определяется геометрией сечения, согласуются через переходы;
- 3 – электронная, механическая;
- 4 – размеры могут определяться мощностью, частотой и количеством резонаторов.

Таблица 3. Сравнительные характеристики электрических фильтров (продолжение)

№	Ценовой диапазон BYN за шт.	Основные производители
1	5.00 - 80 (*)	Mini-Circuits, Murata
2	800 - 7 500	Mini-Circuits, ООО «СВВ», НПФ «Микран»
3	150 - 900	Mini-Circuits, Qorvo, АО «ОНИИП»
4	40 - 300	Murata, Huber+Suhner, НПФ «Микран»
5	0.5 - 5	Murata, TDK, Mini-Circuits, АО «ОНИИП», АО «ЦНИИ»
6	15 - 120 (*)	несерийное производство
7	3 - 15	NDK, Epson, АО «Морион», Завод «Метеор»
8	0.8 - 6	Murata, Walsin, TDK, АО «ОНИИП»
9	350 - 2 500	АО «Завод Магнетон», Huber+Suhner, Spinner
10	50 - 600	Mini-Circuits, Analog Devices
11	30 - 250	Mini-Circuits, НПФ «Микран»
12	120 - 800	Mini-Circuits, НПФ «Микран»
13	20 - 150	Qorvo, Broadcom, Skyworks Solutions
14	1.5 - 12.00	Murata, Qorvo, Qualcomm, ООО «БУТИС», АО «ОНИИП»
15	100 - 500	Temwell, Toko Inc, АО «ОНИИП»
16	80 - 400	АО «ОНИИП»
17	5 - 1500	Mini-Circuits, Filtronic, Kyocera AVX, АО «Микран»
18	3000 - 5000	Teledyne Microwave Solutions, Micro Lambda Wireless, АО «Завод Магнетон», НПФ «Микран»

Примечание: * – указана стоимость фильтра, с учётом возможности мелкосерийного изготовления по конструкторской документации.

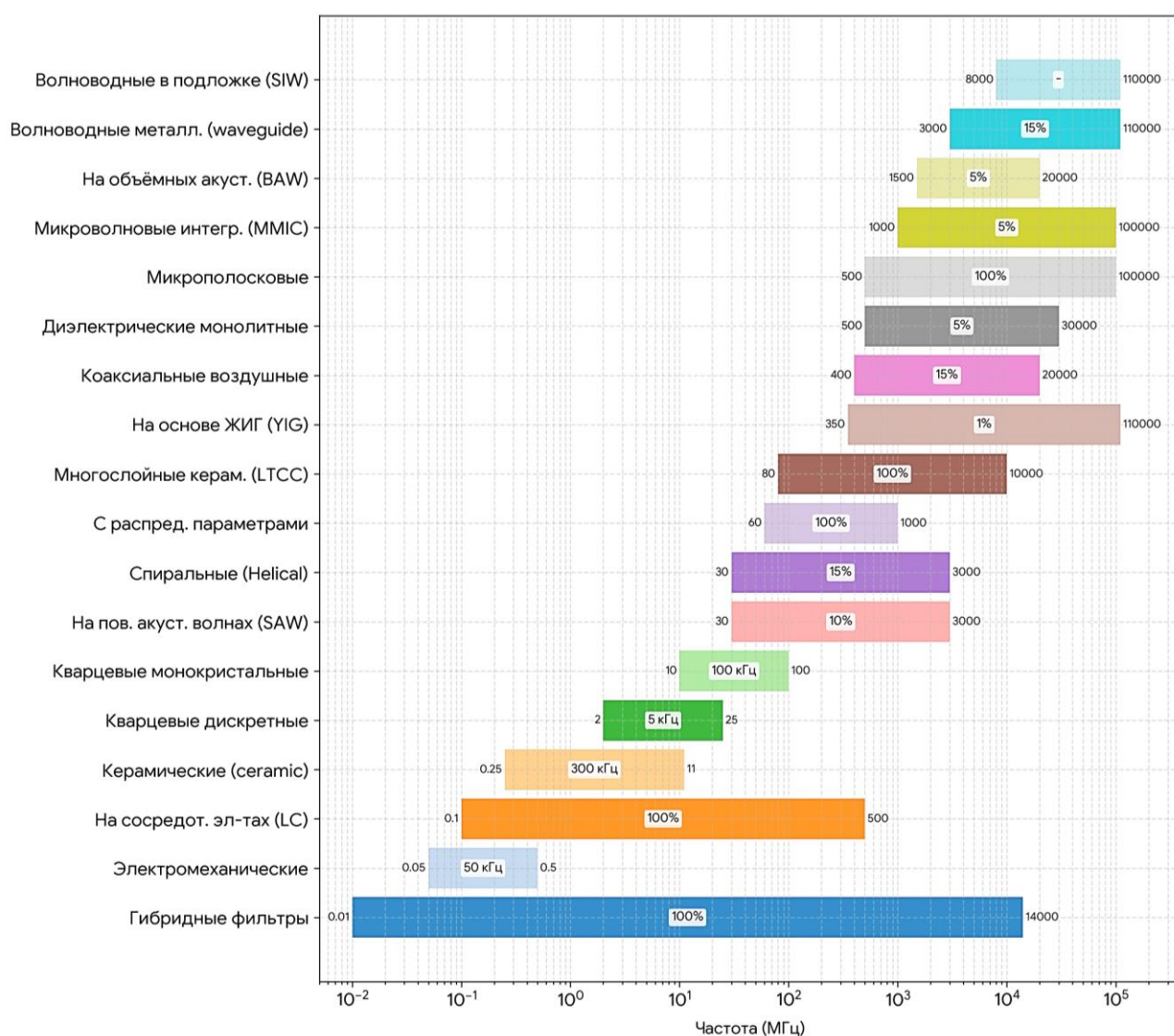


Рис. 4. Частотные диапазоны и полосы пропускания электрических фильтров разных типов

Методика выбора конструкции электрического фильтра

Методика выбора конструкции фильтра заключается в использовании данных из таблицы 1 и рисунка 4 при сопоставлении требуемого параметра фильтра диапазону значений, свойственному каждой технологии изготовления. Приоритетными являются частота, полоса, мощность и потери. Остальные параметры являются второстепенными и могут быть полезными в том случае, если при анализе основных параметров существует несколько возможных реализаций.

Заключение

Проведённый сравнительный анализ параметров электрических фильтров, реализованных с использованием различных технологий, позволяет при помощи предложенной методики осуществлять выбор оптимального варианта конструкции фильтра как при решении инженерных задач, так и в рамках образовательного процесса.

Список использованных источников

1. Зверев, А. И. Справочник по синтезу фильтров = Handbook of Filter Synthesis / А. И. Зверев. – Нью-Йорк : John Wiley & Sons, 1967. – 592 с.
2. Босый, Н. Д. Электрические фильтры : [учебное пособие для вузов] / Н. Д. Босый. – 4-е изд. – Киев : Гостехиздат УССР, 1960. – 616 с.
3. Маттей, Г. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи : в 2 т. / Г. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс ; пер. с англ. под ред. Л. В. Алексеева и Ф. В. Кушнера. – Москва : Связь, 1971–1972. – 2 т.
4. Андреев, Д. П. Механически перестраиваемые приборы СВЧ и разделительные фильтры / Д. П. Андреев, И. И. Гак, И. И. Цимблер. – Москва : Связь, 1973. – 256 с.
5. Орлов, В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах / В. С. Орлов, В. С. Бондаренко. – Москва : Радио и связь, 1984. – 272 с.
6. Hashimoto, K. Acoustic Bulk Wave Devices: Design, Fabrication, and Modeling / K. Hashimoto. – Boston : Artech House, 2003. – 256 p.
7. Ashley, A. MMIC GaAs Isolators and Quasi-Circulators With Co-Designed RF Filtering Functionality / A. Ashley, D. Psychogiou // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 119864–119873.
8. Букин, С. П. Полосно-пропускающие фильтры, выполненные по SIW- и ESIW-технологиям / С. П. Букин, С. В. Крутиев // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2019. – № 1 (540). – С. 13–21.
9. Безбородов, Ю. М. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах / Ю. М. Безбородов, Т. Н. Нарытник, А. М. Фёдоров. – Киев : Техніка, 1989. – 184 с.
10. Фильтры LTCC. Каталог продукции // Техно-ПАРК [Электронный ресурс]. – URL: <https://sawtechno.ru/catalog/filtry/filtry-ltcc/> (дата обращения: 14.05.2026)
11. Костелецкий В. П. Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех // Доклады ТУСУР. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-gibridnyh-filtrov-dlya-zaschity-radioelektronnyh-sredstv-ot-konduktivnyh-pomeh> (дата обращения: 25.05.2026).
12. Дроботун Н. Стабилизация установки центральной частоты ЖИГ-фильтров в измерительных СВЧ-приборах компании «Микран» / Н. Дроботун, Д. Янчук, Н. Харитонов. — Текст : электронный // СВЧ-Электроника : [журнал]. — 2021. — 5 июля. — URL: <https://microwave-e.ru/design/stabilizacziya-ustanovki/> (дата обращения: 25.05.2026).