

# Перестраиваемые по частоте СВЧ-фильтры на основе ферритовых материалов. Часть 2

Владимир ГЕВОРКЯН  
gvm@ems.mpei.ac.ru  
Виктор КОЧЕМАСОВ  
Алексей УСТИНОВ

В первой части статьи, опубликованной в предыдущем номере, описаны принципы построения и проведена классификация ферритовых СВЧ-устройств. В настоящем разделе рассмотрены практические реализации ферритовых фильтров отечественного и зарубежного производства.

## Практическая реализация фильтров отечественными и зарубежными компаниями

### ЖИГ-фильтры

Перейдем к краткому описанию ЖИГ-фильтров, представленных на рынке. Изложение проведем, последовательно комментируя продукцию различных производителей начиная с ведущих зарубежных фирм, которые к настоящему времени доминируют на мировом рынке, причем отметим, насколько широко в рекламных сообщениях демонстрируются параметры предлагаемых устройств. И кстати, обратим внимание на то, что в период с конца 1980-х годов до нынешнего дня наблюдался относительно малый прогресс в совершенствовании селективных ЖИГ-устройств, в результате чего возрождающийся отечественный производитель, имевший достаточный опыт изготовления подобных устройств, весьма конкурентоспособен и перспективен для импортозамещения.

В настоящее время компания Micro Lambda Wireless [1] предлагает самую широкую продуктовую линию СВЧ ЖИГ-фильтров коммерческого и специального назначения в диапазоне частот 500 МГц – 50 ГГц. Различные модели ППФ изготавливаются с числом звеньев от двух до восьми. Режекторные фильтры имеют до 16 звеньев. По требованию заказчика возможна поставка фильтров как коммерческого (0...+65 °С), так и расширенного (-54...+85 °С для военного применения) рабочего температурного диапазона.

На рис. 1 представлен вид некоторых полосно-пропускающих ЖИГ-фильтров. Серия MLFI позиционируется как изделие «миниатюрного дизайна» площадью 31,75×31,75 мм и высотой 14,22 мм и перекрывает диапазон 1–8 ГГц. Минимальные полосы фильтров составляют 20 МГц на уровне 3 дБ. Характеристики фильтров различных моделей и серий приведены в таблице 1.

Фильтры серий MLFM, MLFP, MLFD имеют электромагнитную перестройку частоты в диапазоне 500–50 ГГц. Устройства выпускаются в стандартных кубических корпусах со стороной 25,4; 30,48; 43,18 и 50,8 мм. У некоторых моделей понижена высота, как показано на рис. 1д. Диапазон перестройки этих фильтров составляет от октавы до мультиоктавы, но возможно изготовление фильтров со сверхширокой полосой перестройки. Так, фильтры серии MLFP (рис. 1г) перестраиваются от 3 до 50 ГГц. Количество звеньев варьируется от двух до восьми. Малый уровень пульсаций и перекрытие миллиметрового диапазона частот фильтрами серии MLFP рекламируется производителем как приоритетный на рынке предложений уровень продукции. Типичные характеристики шестизвенного фильтра MLFP-62018 показаны на рис. 2.

К сожалению, представленные параметры не формируют полной картины характеристик указанных устройств, что свойственно обычной ре-

кламной практике иностранных производителей. Тем не менее свойства фильтров, вероятно, соответствуют общедоступному уровню, который можно уточнить, обратившись к каталогу фирмы или проанализировав параметры аналогов фильтров отечественных компаний-изготовителей.



Рис. 1. Внешний вид ЖИГ-фильтров: а) серия MLFI; б) серия MLFM; в–д) серия MLFP

Таблица 1. Параметры полосно-пропускающих ЖИГ-фильтров Micro Lambda Wireless

Тип	Диапазон перестройки, ГГц	Число звеньев	Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	Минимальные потери, дБ	Заграждение, дБ	Неравномерность, дБ
MLFI-41002	1-2	4	20	5	80	2
MLFI-42004	2-4	4	30	5	80	2
MLFI-44008	4-8	4	40	4	80	2
MLFI-42008	2-8	4	30	5	80	2
MLFI-61002	1-2	6	25	6	100	2
MLFI-62004	2-4	6	40	6	100	2
MLFI-64008	4-8	6	45	4	100	2
MLFI-62008	2-8	6	40	5	100	2
MLFM-30520	0,5-2	3	15	8	80	2
MLFM-40540	0,5-4	4	15	8	80	2
MLFM-42008	2-8	4	30	5	80	2
MLFM-42018	2-18	4	30	5	70	2
MLFM-46018	6-18	4	40	5	70	2
MLFP-20520	0,5-2	2	20	4	45	1,5
MLFP-22018	2-18	2	20	4	45	1,5
MLFP-22026	2-26,5	2	20	4	45	1,5
MLFP-40520	0,5-2	4	20	8	80	1,5
MLFP-42008	2-8	4	40	6	80	1,5
MLFP-42018	2-18	4	40	6	80	1,5
MLFP-42026	2-26,5	4	25	6	60	1,5
MLFP-46018	6-18	4	100	6	70	2
MLFP-48018	8-18	4	400	6	70	2
MLFP-62018	2-18	6	50	7	100	2
MLFP-62026	2-26,5	6	30	8	100	2
MLFP-66018	6-18	6	100	6	100	2
MLFP-68018	8-18	6	500	7	100	2,5
MLFP-70520	0,5-2	7	20	12	80	2,5
MLFP-72018	2-18	7	40	7	100	2,5
MLFP-72026	2-26,5	7	30	9	100	2,5
MLFP-76018	6-18	7	500	7,5	100	2,5
MLFP-78020	8-20	7	500	6,5	100	2,5
MLFP-76018L	6-18	7	500	6,5	100	1,5
MLFP-78018L	8-18	7	500	6,5	100	1,5
MLFP-78020L	8-20	7	500	6,5	100	1,5
MLFD-40540	0,5-4	Dual-Two	15	8	50	1,5
MLFD-42008	2-8	Dual-Two	20	5	50	2
MLFD-42018	2-18	Dual-Two	30	5	70	2
MLFD-46018	6-18	Dual-Two	30	4	70	2
MLFP-43040	3-40	4	30+(f/ГГц)	6	80	2,5
MLFP-43044	3-44	4	30+(f/ГГц)	7	80	2,5
MLFP-43050	3-50	4	30+(f/ГГц)	< 3ГГц, 9 дБ > 3ГГц, 7 дБ	60	2,5
MLFP-47040	7-40	4	35+(f/ГГц)	5	80	2,5
MLFP-41840	18-40	4	50+(f/ГГц)	5	80	2,5

Режекторные ЖИГ-фильтры серий MLFR и MLFRD выпускаются для диапазона 2–20 ГГц. Стандартные изделия обеспечивают перестройку в пределах от октавы до полного рабочего диапазона. Фильтры выполнены в стандартном кубическом корпусе со стороной 35,56 мм и коаксиальными (SMA) присоединителями. Внешне они похожи на полосно-пропускающие фильтры.

Фильтры моделей MLFR-0204, MLFR-0408, MLFR-0812 и MLFR-1218 рекламируются как высшее достижение фирмы в диапазонах 2–4; 4–8; 8–12,4; 12,4–18 ГГц и обеспечивают в стандартной конфигурации по уровню 3 дБ полосу 125–150 МГц, а по уровню 40 дБ полосу 15–25 МГц. Предлагаются также модификации ширины полос по уровням 3 дБ и 40 дБ. Прецизионная настройка полосы режекции по уровню 40 дБ поддерживается 16-звенным фильтром. В 2016 году фирма сообщила о выпуске новых режекторных фильтров серии MLUN для диапазона 0,5–18 ГГц. Устройства получили название «ультразаграждающие» (Ultra-Notch). Начиная с частоты 500 МГц они имеют заграждение не менее 50 дБ, а с частоты 2 ГГц — не менее 60 дБ. Характеристики фильтров приведены в таблице 2.

Фирма Micro Lambda Wireless позиционирует свою продукцию для комплектации спутниковых систем связи гражданского и военного применения, широкополосных приемных систем, телекоммуникационных инфраструктур и совмещенных приемо-передающих устройств. Фильтры могут быть ориентированы на использование или снабжены аналоговым или цифровым драйвером питания катушки магнитопровода (рис. 3).

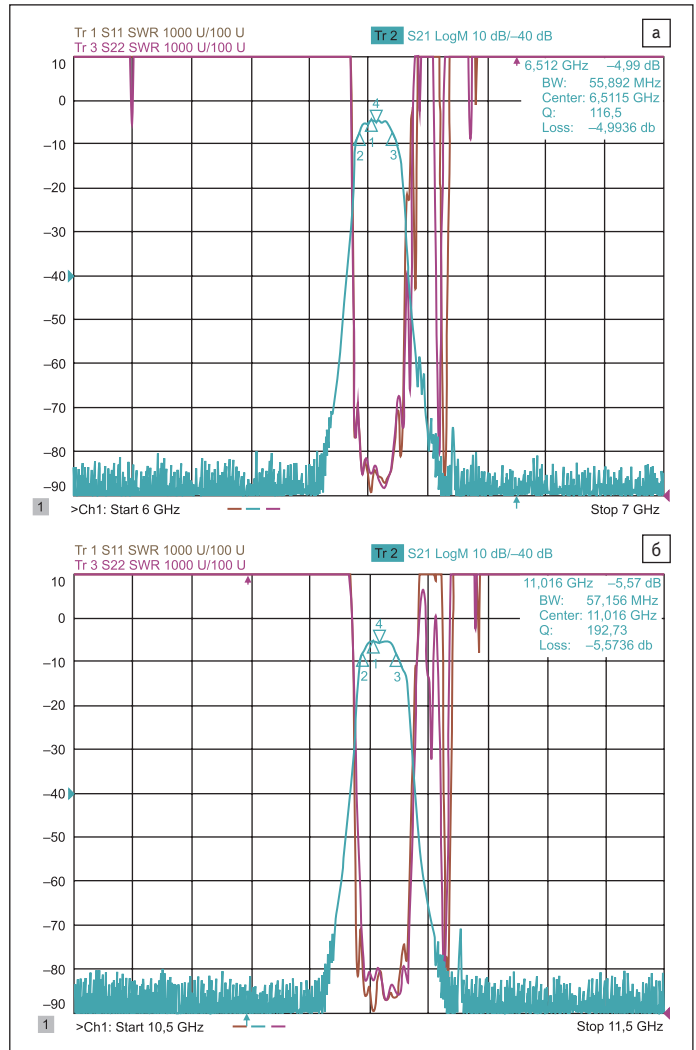


Рис. 2. Типичные характеристики шестизвенных ЖИГ-фильтров фирмы Micro Lambda Wireless

Таблица 2. Параметры полосно-заграждающих ЖИГ-фильтров Micro Lambda Wireless

Тип	Диапазон перестройки, ГГц	Полоса заграждения по уровню -40 дБ, МГц	Полоса заграждения по уровню -3 дБ, МГц	Вносимые потери в полосе пропускания, дБ	Диапазон полосы пропускания, ГГц
MLFR-0204	2-4	15	125	1,5	DC-8
MLFR-0408	4-8	20	150	1,5	DC-10
MLFR-0812	8-12,4	25	150	1,5	DC-18
MLFR-1218	12,4-18	25	150	1,5	DC-18
MLFR-160418	4-18	30	150	1,75	DC-18
MLFR-160618	6-18	40	150	1,75	DC-18
MLFR-160818	8-18	50	150	1,75	DC-18
MLFR-0502	0,5-2	(>0,65 ГГц) 7	100	2	DC-3
MLFR-0208	2-8	(>0,65 ГГц) 15	150	1,5	DC-10
MLFR-0212	2-12	(>0,65 ГГц) 10	150	1,5	DC-18
MLFR-0618	6-18	(>0,65 ГГц) 25	150	1,75	DC-18
MLFRD-0206	2-6	5	120	2	DC-8
MLFRD-0208	2-8	5	120	2	DC-8
MLFRD-0618	6-18	15	100	2	DC-18
MLFRD-0818	8-18	15	100	2	DC-18
MLUN-0502	0,5-2	2*	80	2	DC-3
MLUN-0206	2-6	20*	120	2	DC-6,2
MLUN-0618	6-18	37*	175	2,3	DC-18,2
MLUN-0218	2-18	8*	175	2,3	DC-18,2

Примечание. DC — постоянный ток, характеризует очень низкие частоты.

\*Полоса заграждения по уровню -50 дБ.





Рис. 3. Внешний вид ЖИГ-фильтров с аналоговыми и цифровыми драйверами питания катушки электромагнита

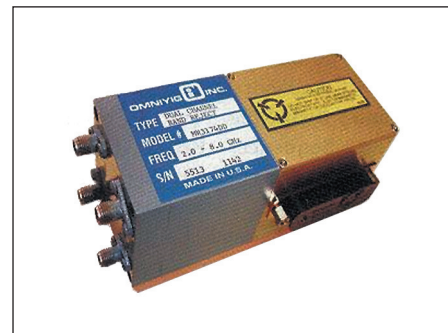


Рис. 4. Внешний вид двухканального синхронно перестраиваемого режекторного ЖИГ-фильтра модели MR3207DC

перестраиваемого в пределах 500–2500 МГц режекторного фильтра модели MR3207DC. Каждый канал имеет минимум 30 дБ режекции в полосе 7–50 МГц, причем с ростом частотного диапазона уровень режекции растет и на частоте 25 ГГц составляет 40 дБ в полосе 20 МГц. Вносимые потери в каждом из каналов не превосходят 1,2 дБ вне полосы режекции. Сдвиг частот перестройки между каналами, отстроенными на 500 МГц, составляет 2 МГц, а при 2500 МГц не превышает 5 МГц. Размеры фильтра 1,7×1,7×1,2 дюйма. Долговечность штатного функционирования фильтра обеспечивается в течение 100 000 ч. Разработка предназначена для систем различного функционального назначения, включая оборонную технику.

Синхронно перестраиваемый двухканальный четырехзвенный ППФ модели M1851 фирмы Omniyig Inc. с диапазоном перестройки от 8 до 12 ГГц, вносимыми потерями в каждом из каналов не выше 3,5 дБ, шириной полосы пропускания по уровню 3 дБ, варьируемой в пределах от 25 до 35 МГц, по внешнему виду подобен двухканальному режекторному фильтру. Типичные размеры фильтра — куб с ребром 1,7 дюйма, но возможны и меньшие размеры. Заявлена очень высокая прямоугольность каждого канала, соответствующая ослаблению на 90 дБ при отстройке от центральной частоты на ±70 МГц. Рабочий диапазон фильтра –55...+85 °С (показатель качества соответствует стандарту США MIL-E-5400). Управление фильтром выполняется как аналоговым, так и цифровым способом. Обычно фильтры поставляются в комплекте с фирменным драйвером. Кроме того, производитель готов к поставкам фильтров с аналогичными параметрами, но с другими (октавными и мультиоктавными) диапазонами перестройки частоты.

Компания Giga-tronics Incorporated [3], более 30 лет существующая на рынке, производит синтезаторы, перестраиваемые и следящие фильтры, генераторы и иную продукцию СВЧ. Кроме того, фирма рекламирует режекторные и полосно-пропускающие фильтры для гражданского и военного применений. Внешний вид продукции и ча-

Перейдем к обзору продукции фирмы Omniyig Inc. [2] — старейшей (не считая отечественных производителей, из числа сохранивших статус) на рынке предложений, основанной в 1973 году для производства продукции электронной техники (в основном военного назначения) СВЧ-устройств на основе сферических ЖИГ-резонаторов. Фирма позиционирует себя в качестве основного поставщика ферритовых селективных устройств для комплектации изделий практически всех стратегических и военных разработок США. По номенклатуре можно заключить о ведущих позициях этого производителя, хотя в настоящее время в мире не наблюдается каких-либо прорывных идей и их реализаций в данной области техники.

Кратко остановимся на предложениях фирмы по ЖИГ-фильтрам, более подробную информацию о параметрах устройств можно узнать в каталогах ее продукции.

Заметим, что основные позиции в рекламируемых линейках селективных устройств занимают в большинстве случаев не отдельные фильтры, а комбинации синхронно перестраиваемых устройств, например структуры из синхронизированных по перестраиваемым частотам фильтров (dual filters) или системы «фильтр/генератор» в вариантах ППФ- или ПЗФ-фильтров.

Фирмой рекламируются ЖИГ-фильтры в диапазоне частот 0,5–26,5 ГГц, имеющие октавные и мультиоктавные диапазоны частотной перестройки. Основная линейка моделей изготавливается для диапазона 0,5–18 ГГц. Фильтры выпускаются в стандартных корпусах в виде кубов с разме-

рами: 30,48×30,48×30,48; 25,4×30,48×30,48; 35,56×35,56×35,56 и 43,18×43,18×43,18 мм. Предлагаются двухзвенные и сопряженные двухканальные двухзвенные, трех- и четырехзвенные фильтры.

В нескольких моделях типа «фильтр/генератор» фильтры перестраиваются синхронно вместе с генераторами в диапазоне частот 500 МГц – 18 ГГц со скоростью до 3 ГГц/400 мкс. Ряд моделей характеризуется малым (для ЖИГ-фильтров) уровнем вносимых потерь (не выше 2,5 дБ), температурной стабильностью, соответствующей отношению 5 МГц/+60 °С и повторяемостью данных в диапазоне перестройки. Примером синхронной системы «фильтр/генератор» служит модель M120 УТО, в которой ЖИГ-фильтр перестраивается в диапазоне 2–8 ГГц, а его частота смещена относительно центральной частоты генератора на 160 МГц. Выходная мощность генератора составляет минимум 13 дБм при фазовых шумах –115 дБс при отстройке от несущей на 100 кГц. Издания квалифицируются по требованиям военного стандарта США (MIL-E-5400 Class II) и имеют рабочий диапазон температур –54...+85 °С.

Одновременно рекламируются семейства аналоговых и цифровых драйверов управления, обладающих малыми размерами и «исключительной» стабильностью параметров. Возможны поставки с интегрированным драйвером, запитываемым от аналогового источника 0–10 В или цифрового 12-разрядного преобразователя.

Укажем на параметры ряда конкретных образцов устройств фирмы. На рис. 4 показан внешний вид двухканального синхронно

Таблица 3. Характеристики ЖИГ-фильтров производства ОАО «Завод «Магнетон»

Тип	ТУ, опытный	Диапазон перестройки, ГГц	Число звеньев	Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	Минимальные потери, дБ (не более)	Заграждение, дБ	Габариты, мм		
							Длина	Ширина	Высота
ФКИНЗ-10-0.4-0.6	Опытный	0,4-0,6	4	7-14	7	80-90	25	25	25
ФКИНЗ-10	ЕСКФ.430441.013ТУ	0,5-2	4	10-30	8	80-90	25	25	25
ФКИНЗ-11	ЕСКФ.430441.013ТУ	2-4	4	20-70	4	80-90	25	25	25
ФКИНЗ-60	ЕСКФ.430441.012ТУ	4-8	4	18-50	4,5	80-90	35	35	30
ФКИНЗ-60-6	Опытный	4-8	6	25-50	5	100-110	35	35	44
ФЛК2-17	ПЯО.226.004 ТУ	1-12	2	12-60	5	55-70	35	35	40
ФКИНЗ-61-1-12	Опытный	1-12	4	12-45	7	80-90	35	35	44
ФКИНЗ-61-2-12	Опытный	2-12	4	12-45	6	80-90	35	35	44
ФКИНЗ-61	ЕСКФ.430441.012ТУ	8-12	4	25-90	4,5	80-90	35	35	30
ФКИНЗ-61-6	Опытный	8-12	6	30-60	5	100-110	35	35	44
ФКИНЗ-61-8-18	Опытный	8-18	4	20-70	4	80-90	35	35	30
ФКИНЗ-61-2-18	Опытный	2-18	4	20-70	7	80-90	35	35	44
ФКИНЗ-61-12-26	Опытный	12-26	4	10-100	6	70	50	50	60
ФКИНЗ-61-18-26	Опытный	18-26	4	30-100	4	70	40	40	45
ФКИНЗ-61-26-36	Опытный	26-36	4	30-140	5	50	50	50	60
ФКИНЗ-60В	Опытный	8-37,5	4	10-120	3-6	50-80	50	50	60
ФПИНЗ-4-0.4-0.8*	Опытный	0,4-0,8	3	7-14	5	70	30	30	12
ФПИНЗ-4А*	ЕСКФ.430441.015ТУ	0,87-1,05	3	10-18	6	70	30	30	12
ФПИНЗ-4А*	ЕСКФ.430441.015ТУ	0,95-1,25	3	10-18	6	70	30	30	12
ФПИНЗ-4-2.7-3.2*	Опытный	2,7-3,2	3	20-40	4	60-70	30	30	19

Примечание. \* Модели с микрополосковыми выводами.



Рис. 5. Внешний вид ЖИГ-фильтров производства ОАО «Завод «Магнетон»: а) с коаксиальными выводами; б) с микрополосковыми

стотные характеристики аналогичны ЖИГ-фильтрам других производителей, например фирмы Micro Lambda Wireless.

Среди отечественных производителей устройств на сферах ЖИГ широко известно ОАО «Завод «Магнетон» [4], с советских вре-

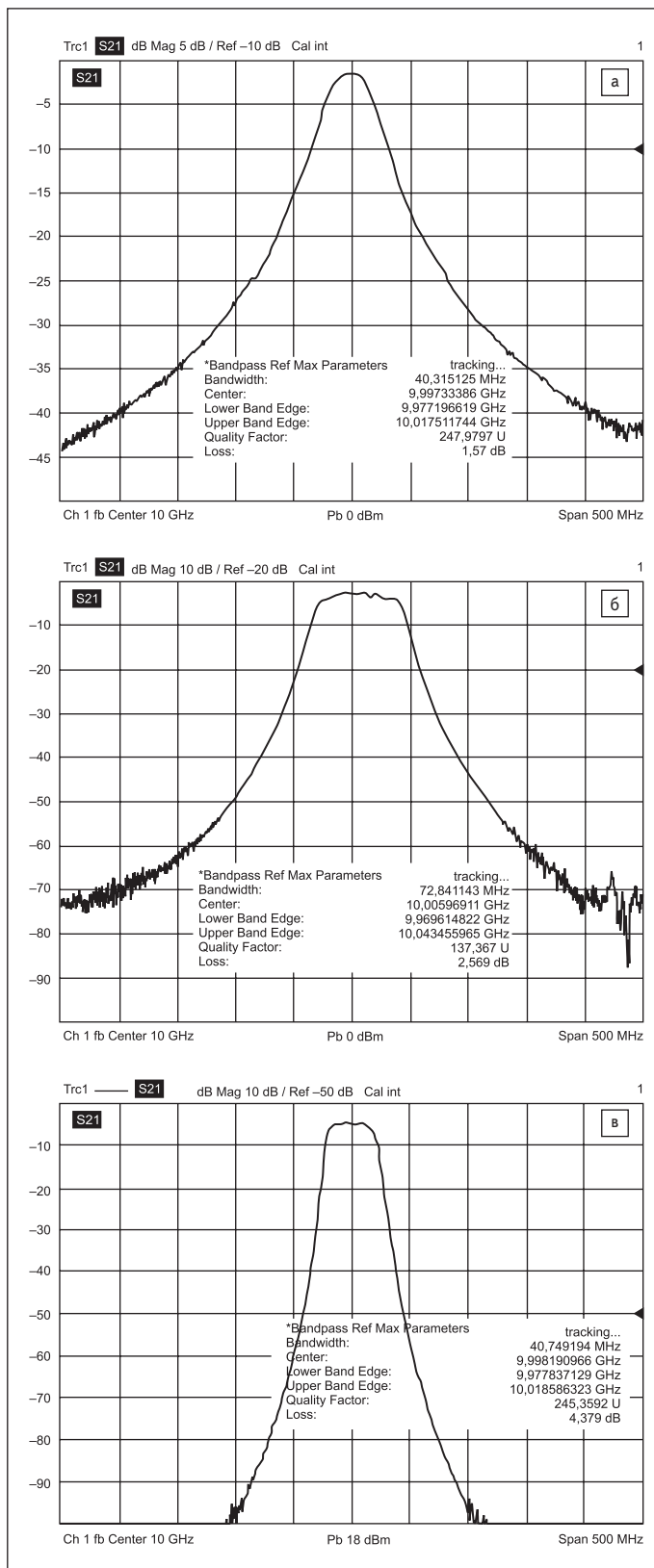


Рис. 6. Типичные характеристики ЖИГ-фильтров производства ОАО «Завод «Магнетон»: а) двухзвенные; б) четырехзвенные; в) шестизвенные

мен сохранившее ведущие позиции в изготовлении фильтров. Номенклатура опытных и серийно выпускаемых «Магнетоном» перестраиваемых полосно-пропускающих фильтров превышает два десятка наименований [4]. Это пока единственное в России пред-



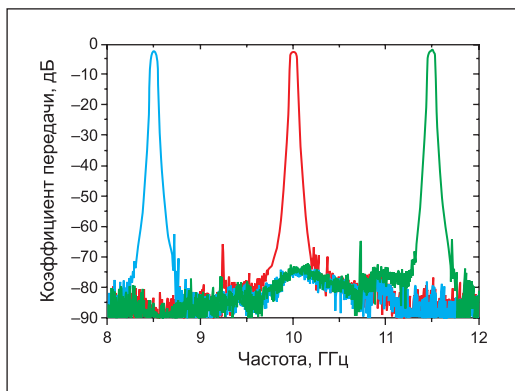


Рис. 7. Характеристики перестройки четырехзвенного ЖИГ-фильтра ФКИН2-61 в диапазоне 8–12 ГГц



Рис. 8. Внешний вид перестраиваемого ЖИГ-фильтра фирмы «Кварц»

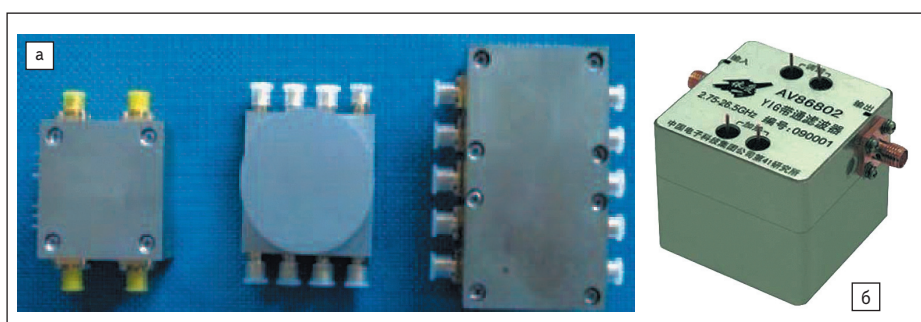


Рис. 9. а) Многоканальные перестраиваемые ЖИГ-фильтры фирмы MIL-YIG с высокой степенью идентичности АЧХ и ФЧХ; б) фильтр фирмы Xi'an Yima

Другим российским предприятием, производящим широкую номенклатуру ЖИГ-фильтров, является АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц» им. А.П. Горшкова» [5], что подтверждается параметрами изделий двух-, трех- и четырехзвенных фильтров с конфигурацией, изображенной на рис. 8, рекламируемых как изделия с высокой линейностью перестройки в широком диапазоне частот и надежностью. Параметры приведены в таблице 4.

Стандартные параметры обеспечивают в диапазоне температур  $-10...+60$  °С при мощностях до 10 мВт. Фильтры могут быть снабжены соединителями как отечественного метрического, так и дюймового стандартов. Кроме того, характеристики фильтров могут быть улучшены при реализации в более узких частотных диапазонах.

В России сферические ЖИГ-резонаторы для производства ЖИГ-фильтров изготавливает ОАО «НИИ «Феррит-Домен» [6]. Это предприятие также выпускает ЖИГ-фильтры, правда, в меньших количествах, чем ОАО «Завод «Магнетон» и АО «ФНПЦ «НИИПИ «Кварц». С полной номенклатурой изделий ОАО «НИИ «Феррит-Домен» можно ознакомиться на сайте предприятия [6].

Помимо крупных производителей СВЧ-продукции, предлагающих широкую номенклатуру ферритовых изделий, некоторые типы ЖИГ-фильтров рекламируют другие предприятия. Так, фирмой RADITEC Inc. [7] освоен выпуск линеек фильтров с драйверами в диапазоне 0,5–40 ГГц. Стандартный диапазон перестройки составляет 0,5–1,0; 1–2; 2–4; 4–8; 12–18; 18–26 и 26–40 ГГц, а полоса пропускания варьируется в пределах 10–40 МГц. Появились на рынке и китайские производители: Xi'an Yima Opto-Electrical Technology Co., Ltd. [8] и MIL-YIG [9] (рис. 9).

Заканчивая рассмотрение ЖИГ-фильтров, отметим, что параметры предложений разных производителей, как зарубежных, так и отечественных, отличаются незначительно, что соответствует хорошей исторически длительной проработке вопросов производства таких устройств и общедоступности рекомендаций по оптимизации их параметров.

#### МСВ-фильтры на пленках ЖИГ

Фильтры на пленках ЖИГ имеют ряд преимуществ перед фильтрами на сферах ЖИГ, главными из которых являются миниатюрность, планарность конструкции и возможность изготовления по интегральной технологии. Что касается технических характеристик, здесь можно выделить высокую избирательность, скорость перестройки центральной частоты и широкий интервал рабочих температур  $-50...+70$  °С. Кроме того, фильтры на МСВ представляют собой невзаимные устройства и обеспечивают потери при передаче сигнала с выхода на вход

приятие, выпускающее фильтры как на сферах, так и на пленках ЖИГ. В линейке ЖИГ-фильтров присутствуют как малогабаритные узкополосные октавные фильтры, так и многооктавные полосно-пропускающие фильтры диапазона 0,4–37,5 ГГц. Модели содержат до шести звеньев и имеют широкий (до нескольких октав) диапазон перестройки частоты, полосы пропускания 0,1–5%, частотную избирательность 22–36 дБ/октава и высокое внеполосное заграждение, достигающее в некоторых устройствах 110 дБ. Недавно началось производство двухканальных синхронно перестраиваемых моделей.

Фильтры выполняются как с электрической, так и с механической перестройкой частоты. Стандартный интервал рабочих температур составляет  $-10...+70$  °С, однако для военного применения он может быть увеличен до  $-50...+70$  °С.

Перечень ЖИГ-фильтров, выпускаемых заводом «Магнетон» (в том числе по техническим условиям), приведен в таблице 3. Фильтры изготавливаются как с коаксиальными разъемами, так и с микрополосковыми выводами. Модели с микрополосковыми выводами в таблице 3 обозначены звездочкой. Внешний вид фильтров показан на рис. 5. Подробное описание параметров всех технических решений этих устройств можно найти на сайте компании [4], мы же кратко остановимся на свойствах ряда из них, чтобы продемонстрировать уровень характеристик предлагаемых изделий.

На рис. 6 показаны АЧХ двухзвенных, четырехзвенных и шестизвенных фильтров на центральной частоте 10 ГГц. Вносимые потери для двухзвенного фильтра составляют 1,6 дБ, для четырехзвенного — 2,6 дБ и для шестизвенного — 4,4 дБ. Фильтры имеют малую неравномерность потерь в полосе пропускания. Ширина полосы пропускания по уровню 3 дБ варьируется в пределах 40–73 МГц. Частотная избирательность фильтров и внеполосное заграждение возрастают с числом звеньев. Шестизвенные фильтры (рис. 6в) имеют самую высокую избирательность по частоте (до 36 дБ/октава) и заграждение вне полосы пропускания 90–110 дБ в диапазонах частот 4–8 и 8–12 ГГц.

Перестройка четырехзвенного ЖИГ-фильтра модели ФКИН2-61 в номинальной полосе рабочих частот 8–12 ГГц показана на рис. 7. Для данной модификации полоса пропускания составляет 73 МГц по уровню  $-3$  дБ. Минимальные вносимые потери при перестройке практически не меняются и не превышают 2,7 дБ.

Среди преимуществ фильтров на сферах ЖИГ следует отметить высокую скорость перестройки частоты, линейность перестройки в широком диапазоне частот, высокую надежность. ЖИГ-фильтры, выпускаемые «Магнетоном», соответствуют категории качества ВП или ОТК. Они постоянно совершенствуются, ассортимент продукции расширяется. Возможно изготовление фильтров по требованиям заказчика.

Таблица 4. Характеристики модельного ряда ППФ фирмы «Кварц»

Число резонаторов	Тип фильтра	Диапазон частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	Полоса на уровне $\pm 3$ дБ, МГц, min	Развязка, дБ, min	Ослабление паразитных резонансов, дБ, min	Суммарная неравномерность в полосе, дБ, max	Линейность, МГц, ном.	Гистерезис, МГц, ном.	Крутизна перестройки, МГц/мА	Тип соединителя	Габариты, мм
2 резонаторных фильтра	FFK2-1	0,5–2	6	10	40	20	2	$\pm 3$	5	10	3,5(f)	25×30×45
	FFK2-2	1–12,4	5	12	40	20	2	$\pm 10$	15	25	3,5(f)	44×44×68
	FFK2-3	2–18	4	18	40	20	2	$\pm 10$	20	30	3,5(f)	52×52×85
	FFK2-4	2–26	5	15	35	20	2,5	$\pm 25$	25	30	3,5(f)	52×52×85
3 резонаторных фильтра	FFK3-1	0,2–5	7	12	60	40	2	$\pm 3$	5	10	3,5(f)	25×30×45
	FFK3-2	1–12,4	6	14	65	40	2	$\pm 10$	15	25	3,5(f)	44×44×68
	FFK3-3	2–18	4,5	20	65	40	2	$\pm 10$	20	30	3,5(f)	52×52×85
4 резонаторных фильтра	FFK4-1	0,2–5	8	14	80	50	2	$\pm 3$	5	10	3,5(f)	25×30×45
	FFK4-2	1–12,4	7	15	80	50	2	$\pm 10$	15	25	3,5(f)	44×30×68
	FFK4-3	2–18	6	20	80	50	2	$\pm 10$	20	30	3,5(f)	52×52×85
	FFK4-4	2–26,5	7	20	70	50	2,5	$\pm 40$	25	30	3,5(f)	52×52×85
	FFK4-5	26,5–40	7	30	60	40	2	$\pm 35$	65	40	2,4(f)	52×52×85

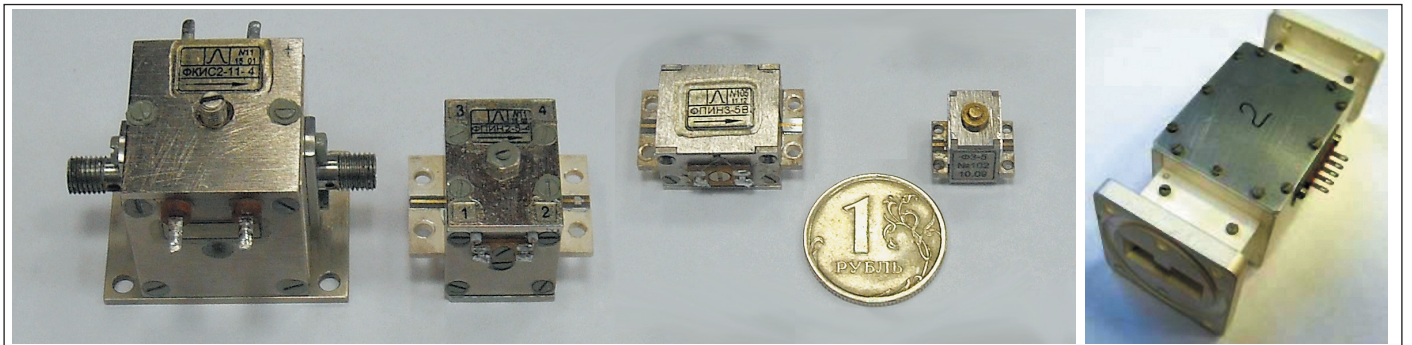


Рис. 10. Внешний вид МСВ-фильтров производства ОАО «Завод «Магнетон»

не менее 25 дБ. Благодаря перечисленным преимуществам в последние годы наблюдается интерес к разработке и применению фильтров на пленках ЖИГ.

В настоящее время рынок предложений СВЧ-фильтров на МСВ ограничен изделиями двух российских предприятий — ОАО «Завод «Магнетон» и НП ОАО «Фаза». Информация о выпуске импортных устройств на основе пленок ЖИГ в открытой печати отсутствует. Приведем данные о рекламируемых серийных МСВ-фильтрах.

ОАО «Завод «Магнетон» предлагает широкую номенклатуру фильтров с коаксиальными соединителями, в микрополосковом и волноводном исполнении, внешний вид которых показан на рис. 10. Фильтры с коаксиальными выводами снабжаются соединителями типа IX (гнездо) или SMA (femail) по ГОСТ РВ 51914-2002 с волновым сопротивлением СВЧ-тракта 50 Ом. Перестройка частоты фильтров может быть электрической или механической. Фильтры с электрической перестройкой работают без подачи тока управления на фиксированной частоте и перестраиваются с помощью тока управления. Перестройка центральной частоты в сторону более высоких или более низких частот зависит от полярности напряжения, подаваемого на обмотки магнитопровода фильтра.

Модельный ряд МСВ-фильтров завода «Магнетон» приведен в таблице 5. Устройства имеют коаксиальные соединители, за исключением обозначенных звездочкой, которые имеют микрополосковые выводы. Изделия охватывают частоты 1,5–20 ГГц. Диапазон перестройки фильтров от центральной частоты составляет 250 МГц – 1 ГГц. Фильтры имеют высокую прямоугльность АЧХ и время перестройки 10–50 мкс. По требованию заказчика возможно изготовление фильтров с полосами пропускания 20–200 МГц и с увеличенным диапазоном перестройки. Типичные характеристики МСВ-фильтров 3-см диапазона показаны на рис. 11.

Заграждение фильтров, составляющее 50 дБ, может быть повышено до 60–70 дБ за счет увеличения минимальных потерь до 5 дБ. Фильтры диапазона частот 1,5–10 ГГц с электрической перестройкой частоты на 500 МГц имеют типичные габаритные размеры 20×26×25 мм. Максимальный ток управления 300–600 мА определяет заказчик.

Таблица 5. Характеристики МСВ-фильтров на пленках ЖИГ производства ОАО «Завод «Магнетон»

Тип	ТУ, опытный	Диапазон значений начальной фиксированной частоты, ГГц	Электрическая перестройка центральной частоты от начальной, ГГц	Полоса пропускания по уровню $-3$ дБ, МГц	Минимальные потери, дБ	Заграждение, дБ
ФКИС2-11-2-8	Опытный	1,5–8	0,25	20–60	3	35
ФКИС2-12-2-8	Опытный	1,5–8	1	20–50	4	50
ФКИС2-12	ЕСКФ. 430441.020ТУ	8–10	1	30–60	4,5	50
ФКИС2-12А	ЕСКФ. 430441.020ТУ	10–12	1	30–60	4,5	40
ФКИС2-12-12-20	Опытный	12–20	0,5	30–70	4,5	40
ФПИНЗ-5*	ФТСК.430441.005ТУ	2–4	0,3	20–60	4,5	50
ФПИНЗ-5А*	ФТСК.430441.005ТУ	4–8	0,25	20–60	4,5	50
ФПИНЗ-5*	Опытный	4–10	0,4	20–50	4,5	50

Примечание. \* Фильтры с микрополосковыми выводами.

В линейке предложений завода представлены малогабаритные фильтры на фиксированные частоты в диапазоне 2–6 ГГц с механической подстройкой частоты. Фильтры выполнены с микрополосковыми выводами. Они имеют следующие характеристики: минимальные вносимые потери не более 4,5 дБ, диапазон механической перестройки центральной частоты 50 МГц, полоса пропускания (по уровню  $-3$  дБ) 30–80 МГц. Габаритные размеры фильтров составляют 15×11×18 мм.

Интересные возможности применения фильтров на МСВ демонстрируют двухкаскадные коаксиальные фильтры с синхронной перестройкой центральной частоты (рис. 12а), разработанные на базе модели типа ФКИС2-12. Максимальный ток управления 300–1000 мА определяет заказчик. За счет синхронности управления параметры устройств мало меняются в диапазоне перестройки. Каскады фильтров могут быть соединены через малошумящий усилитель. Фильтры имеют высокую избирательность 36–45 дБ/октава и заграждение более 90 дБ. Диапазон значений начальной частоты составляет 2–11 ГГц, электрическая пере-

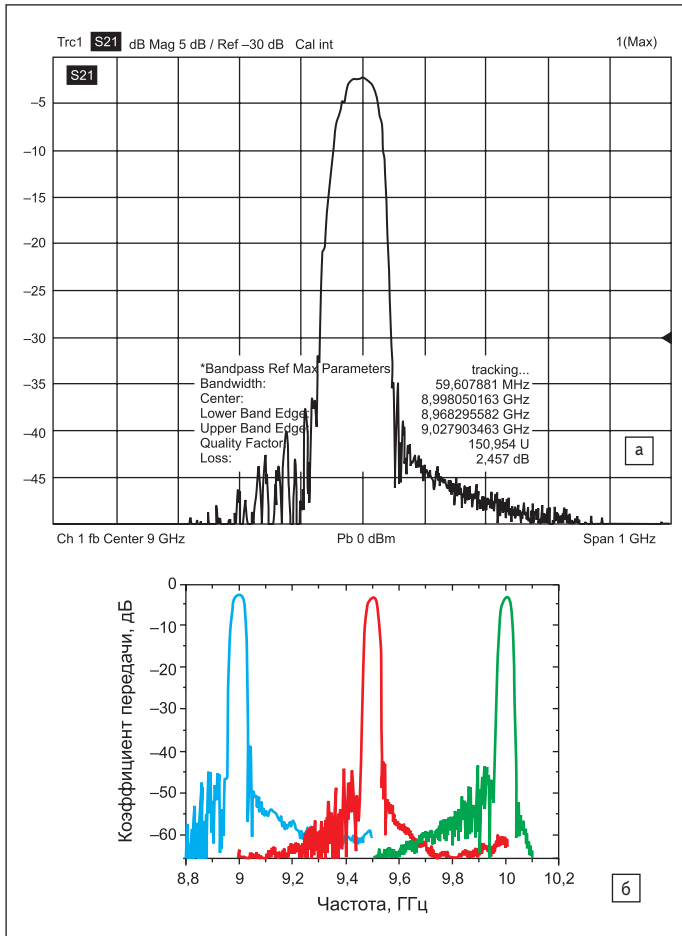


Рис. 11. Фильтр ФКИС2-12 производства ОАО «Завод «Магнетон»: а) типичная АЧХ; б) характеристики перестройки

стройка центральной частоты 1 ГГц, минимальные потери 8 дБ, полоса пропускания 25–60 МГц, уровень паразитных резонансов не более 60 дБ. На рис. 12б сплошной линией показана АЧХ такого фильтра с центральной начальной частотой 10,250 ГГц. Пунктирной линией обозначена АЧХ при электрической перестройке вниз по частоте на 500 МГц.

Для управления фильтрами изготовителем предлагаются модули (драйверы), которые представляют собой прецизионный управляемый источник тока. Драйвер обеспечивает перестройку, поддержание и стабилизацию центральной частоты фильтра. Перестройка частоты фильтра осуществляется от внешнего сигнала, подаваемого на драйвер, в виде напряжения или цифрового кода. На рис. 13а приведен пример драйвера, предлагаемого компанией для своих изделий. По желанию заказчика могут быть поставлены фильтры с драйверами, интегрированными в один модуль, как показано на рис. 13б.

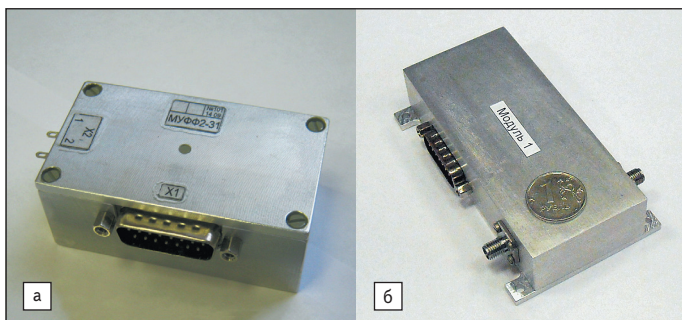


Рис. 13. Двухкаскадный МСВ-фильтр: а) драйвер для управления; б) модульная сборка с драйвером

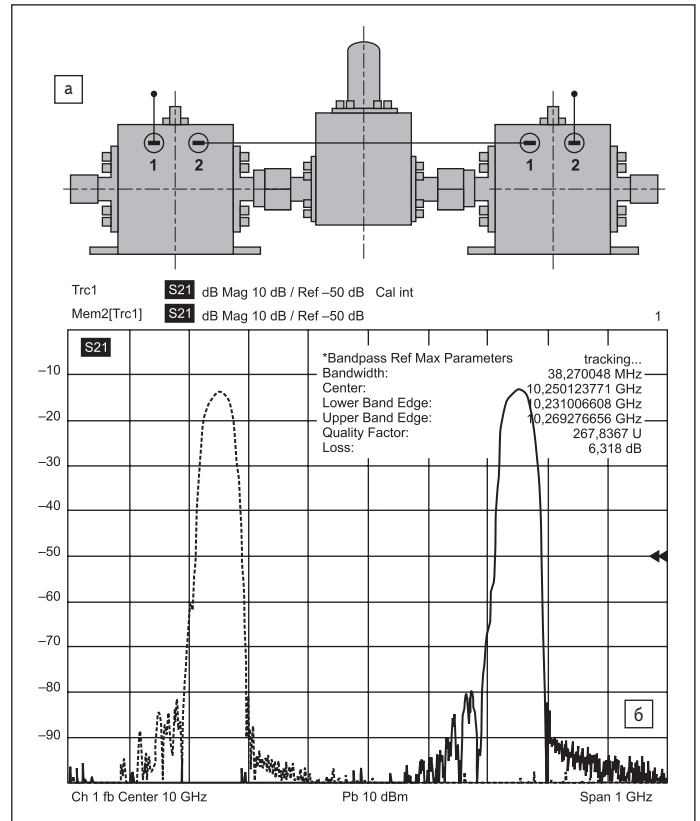


Рис. 12. Двухкаскадный МСВ-фильтр: а) схематическое изображение; б) амплитудно-частотные характеристики

Модуль откалиброван в рабочем диапазоне температур и обеспечивает абсолютную погрешность установки частоты не более  $\pm 3$  МГц.

Перейдем теперь к номенклатуре полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров, предлагаемых НП ОАО «Фаза» [10]. Предприятие разрабатывает и производит перестраиваемые ППФ, имеющие центральную частоту в диапазоне 1–20 ГГц. Управление ППФ осуществляется однополярным или двуполярным током. Фильтры имеют следующие типичные параметры: минимальные потери в полосе пропускания не более 6 дБ, максимальный диапазон перестройки центральной частоты  $\pm 2000$  МГц, уровень внеполосного заграждения 45–70 дБ в зависимости от рабочего диапазона, полоса пропускания (по уровню -3 дБ) 10–350 МГц, уровень паразитного резонанса 25–35 дБ, интервал рабочих температур -60...+65 °С. Возможно изготовление двухрезонаторного ППФ, у которого вносимые потери в полосе пропускания не более 8 дБ, а внеполосное заграждение не менее 80 дБ. Предприятием также разрабатываются и выпускаются ППФ с механической перестройкой, имеющие похожие характеристики. Диапазон механической перестройки частоты не менее  $\pm 200$  МГц.

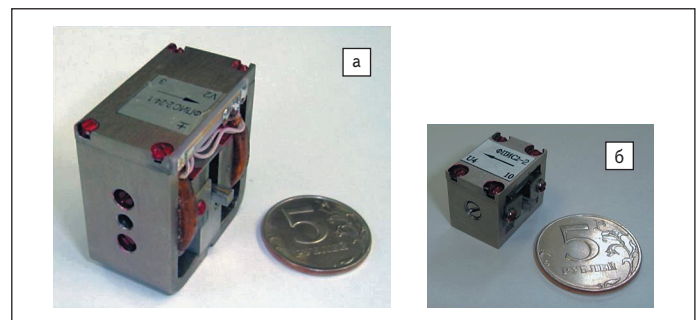


Рис. 14. Внешний вид ППФ на МСВ с перестройкой частоты: а) электрической; б) механической



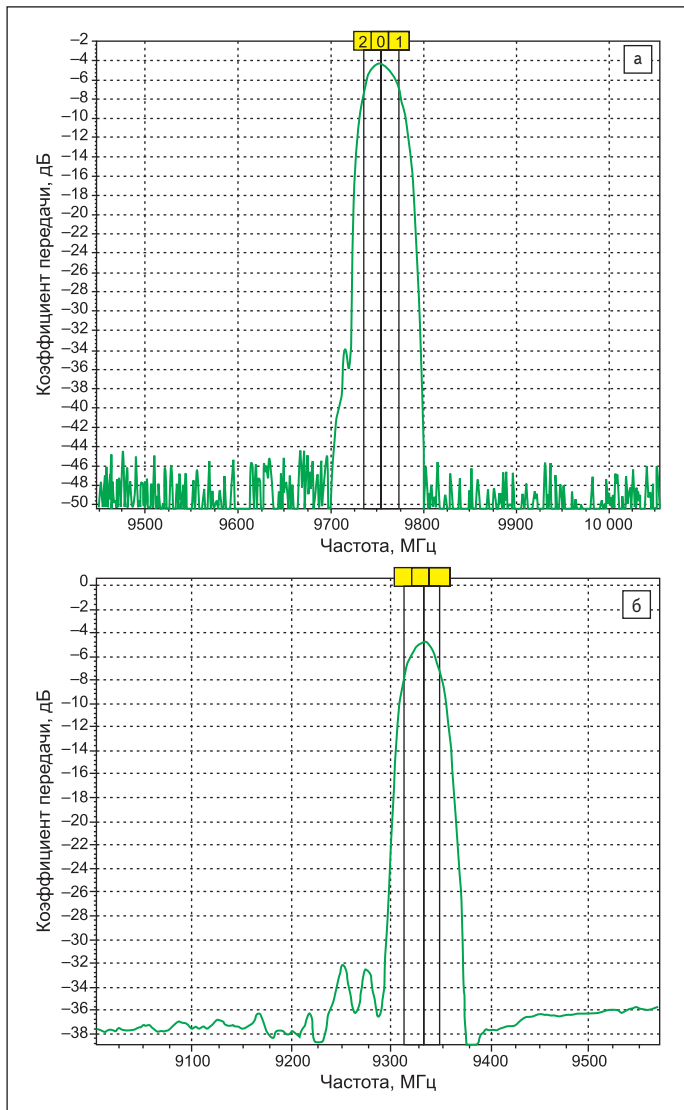


Рис. 15. Типичные характеристики фильтров, выпускаемых НП ОАО «Фаза», с перестройкой частоты: а) механической; б) электрической

На рис. 14а показаны размеры и внешний вид ППФ с рабочим диапазоном электрической перестройки АЧХ на  $\pm 2000$  МГц. Фильтр с механической перестройкой представлен на рис. 14б. Конструктивно фильтры могут быть выполнены как с микрополосковыми, так и с коаксиальными входом и выходом. Типичная характеристика фильтра ФПИС2-24-1 с механической перестройкой приведена на рис. 15а. Характеристика электрически перестраиваемого фильтра ФПИС2-1, имеющего рабочий диапазон частот 7,1–10,8 ГГц, дана на рис. 15б.

Наряду с полосно-пропускающими фильтрами, предприятие предлагает к поставке полосно-заграждающие фильтры на МСВ в диапазоне частот 2–20 ГГц с параметрами: полоса заграждения (по уровню  $-30$  дБ) 10–500 МГц, заграждение более 40 дБ, потери вне полосы заграждения 0,5–2,5 дБ в зависимости от рабочего диапазона частот, коэффициент прямоугольности (по уровню  $-30$  дБ) 2–2,5. Кроме того, НП ОАО «Фаза» изготавливает ПЗФ на фиксированную частоту (рис. 16а) с аналогичными параметрами. Диапазон механической перестройки АЧХ не менее  $\pm 200$  МГц относительно центральной частоты. Типичная характеристика ПЗФ (6Ш2.067.119 ТУ) приведена на рис. 16б.

Завершая обзор фильтров на МСВ, можно отметить, что предложения рынка характеризуют достойный уровень как по номенклатуре предложений, так и по параметрам устройств. Отсутствие рекламных данных зарубежных производителей отнюдь не связано с отсутствием таковых, но, вероятно, ограничено назначением про-

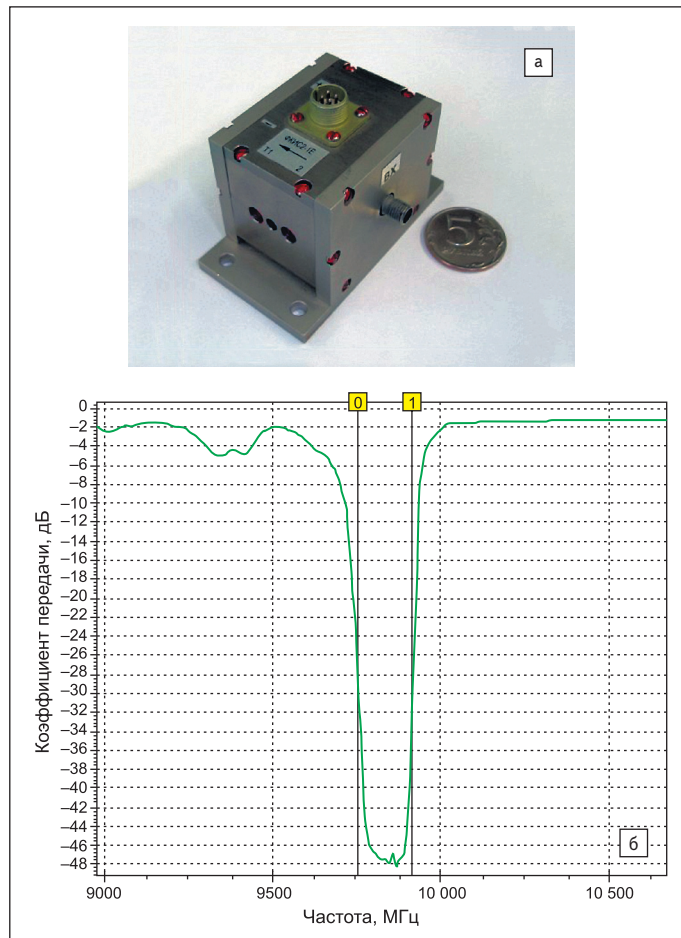


Рис. 16. ПЗФ на МСВ (6Ш2.067.119 ТУ): а) внешний вид; б) АЧХ

дукции, ориентированной в основном на комплектацию изделий военного применения.

## Заключение

Проведенный обзор состояния рынка перестраиваемых гиромагнитных пассивных селективных устройств демонстрирует широкую номенклатуру доступных изделий иностранного изготовления в области ЖИГ-фильтров. Отечественный производитель уступает в широте номенклатуры предлагаемых устройств, что связано с узостью российского рынка потребления данной продукции. В то же время отечественная продукция актуальных изделий на МСВ в условиях ограниченных зарубежных предложений демонстрирует рост номенклатуры устройств, характеризующихся конкурентным в сравнении с зарубежными аналогами уровнем параметров.

## Литература

1. MicroLambdaWireless. [www.microlambdawireless.com](http://www.microlambdawireless.com)
2. Omniyig Inc. [www.omniyig.com](http://www.omniyig.com)
3. Giga-tronics. [www.gigatronics.com](http://www.gigatronics.com)
4. ОАО «Завод «Магнетон». [www.magneton.ru](http://www.magneton.ru)
5. ОАО ФНПЦ «ЦНИПИ «Кварц» им. А. П. Горшкова». [www.kvarz.com/general/filtr.html](http://www.kvarz.com/general/filtr.html)
6. ОАО «НИИ «Феррит-Домен». [www.domen.ru](http://www.domen.ru)
7. RADITEK Inc. [www.raditek.com/YIG/yigbpf.htm](http://www.raditek.com/YIG/yigbpf.htm)
8. Xi'an Yima Opto-Electrical Technology Co., Ltd. [www.yima.en.alibaba.com/company\\_profile.html](http://www.yima.en.alibaba.com/company_profile.html)
9. MIL-YIG. [www.yigmicrowave.com](http://www.yigmicrowave.com)
10. НП ОАО «Фаза». [www.faza-don.ru](http://www.faza-don.ru)