

# МИНИАТЮРНЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ для РЭА СВЧ

## СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Если знания человека не упорядочены, то, чем больше он знает, тем больше будет путаница в его мыслях.*

Герберт Спенсер

**Борьба с электромагнитными помехами (ЭМП) – одна из важнейших задач, требующих решения при создании РЭА СВЧ. Сегодня по мере миниатюризации, увеличения плотности компоновки, сложности и функциональных возможностей аппаратуры, усиления взаимного влияния ее элементов эта проблема усложняется. Поэтому фильтрация паразитных сигналов с помощью помехоподавляющих фильтров приобретает первостепенное значение. Расчету и проектированию фильтров посвящено большое число основополагающих работ отечественных и зарубежных авторов. Однако в них не систематизирован современный опыт разработки и применения фильтров в РЭА СВЧ. Постараемся в какой-то степени восполнить этот пробел и дать разработчикам информацию, необходимую для выбора и рационального применения фильтров в РЭА СВЧ и различных радиотехнических устройствах.**

тот (ФНЧ). Такие фильтры защищают радиотехническое устройство от помех, распространяющихся от источников питания, и, наоборот, цепь питания – от помех, создаваемых устройством. Фильтры включают между источником и нагрузкой в каждый незаземленный провод цепи питания, по возможности ближе к источнику помех.

**Помехоподавляющий фильтр нижних частот** представляет собой линейный четырехполюсник, предназначенный для частотной селекции сигналов. Фильтр выделяет из сложного электромагнитного колебания, подаваемого на его вход, частотные составляющие, расположенные в заданной полосе пропускания, и подавляет частотные составляющие в заданной полосе задержания (рис. 1а) [4-8]. Основные показатели эффективности фильтра – частота среза ( $f_{cp}$ ), на которой вносимое затухание равно 3 дБ, величина вносимого затухания в заданном диапазоне частот и ширина полосы перехода. Чем больше величина вносимого затухания и чем уже полоса перехода, тем выше эффективность подавления ЭМП. Величину вносимого затухания определяют в 50-Ом измерительной схеме, поэтому при включении фильтра в электрическую схему, импедансы источника и нагрузки которой отличаются от 50 Ом, величина вносимого затухания будет отличаться от измеренной.

**Действие ФНЧ** основано на отражении и частичном поглощении ЭМП в индуктивности и емкости. Для эффективного отражения, т.е. “закорачивания” ВЧ-составляющих напряжения, подаваемого на вход фильтра, необходимо, чтобы емкостное сопротивление фильтра было минимальным, а его электрическая емкость – как можно более высокой. Поглощение ЭМП в фильтре происходит за счет магнитных потерь в индуктивности и диэлектрических потерь в конденсаторе. Предпочтительнее фильтры, обеспечивающие подавление помех за счет их поглощения.

Помехоподавляющие ФНЧ могут иметь **различные электрические схемы**.

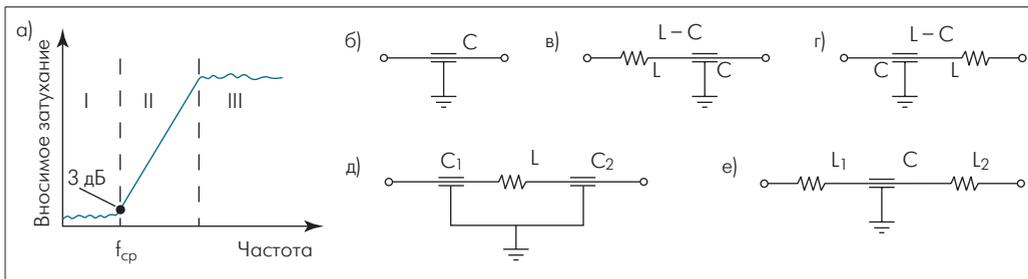
**Простейший С-фильтр** (рис. 1,б) – проходной конденсатор с тремя выводами при включении между источником помехи и нагрузкой – отделяет постоянный ток или токи низкой частоты от токов высокой частоты. При большой емкости конденсатор шунтирует переменную составляющую тока и она не попадает в нагрузку, в которую поступает постоянный ток. Поэтому чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше должна быть емкость фильтра для цепей питания. Причем величину емкости следует выбирать, исходя из наименьшей рабочей частоты.

**L-C – фильтр** (рис. 1в) содержит один индуктивный и один емкостной элементы. Возможны два варианта включения L- и C-элементов (рис. 1в и г). Правда, для правильного выбора варианта необходимо знать величины входных и выходных импедансов во всем диапазоне рабочих частот. В противном случае, как, например, в случае несоглас-

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ И МЕТОДЫ ИХ ПОДАВЛЕНИЯ

Паразитные связи по электрическим цепям приводят к появлению на выходе РЭА СВЧ напряжений и токов, не соответствующих основному назначению аппаратуры. Например, паразитные наводки, проникающие с входа на выход малошумящего усилителя, вызывают его самовозбуждение или изменение характеристик. Причина паразитной связи – наличие общего сопротивления для всех каскадов усилителя, подключенных к источнику питания. Из всех видов ЭМП [1-5] наиболее опасны кондуктивные помехи, распространяющиеся в проводящей среде – цепях питания, управления, коммутации, а также в цепях полезных сигналов. Наиболее часто кондуктивные помехи проявляются в виде наложения гармоник переменного напряжения цепи питания на выходные сигналы устройства. Появление таких помех вызвано недостаточным сглаживанием напряжения источника питания, паразитными связями элементов устройства с цепью питания, неэквивалентностью точек заземления отдельных элементов.

Основное средство борьбы с кондуктивными ЭМП, создаваемыми в цепях питания и управления постоянного и переменного токов, – их фильтрация при помощи помехоподавляющих фильтров нижних час-



**Рис. 1. Частотная зависимость вносимого затухания ФНЧ (а) и электрические схемы: С-фильтра (б), L-С-фильтра для случая низкого импеданса источника питания и высокого импеданса нагрузки (в), L-С-фильтра для случая высокого импеданса источника питания и низкого импеданса нагрузки (г), Pi-фильтра (д), Т-фильтра (е).**

**I – Полоса пропускания; II - Полоса перехода; III- Полоса задержания**

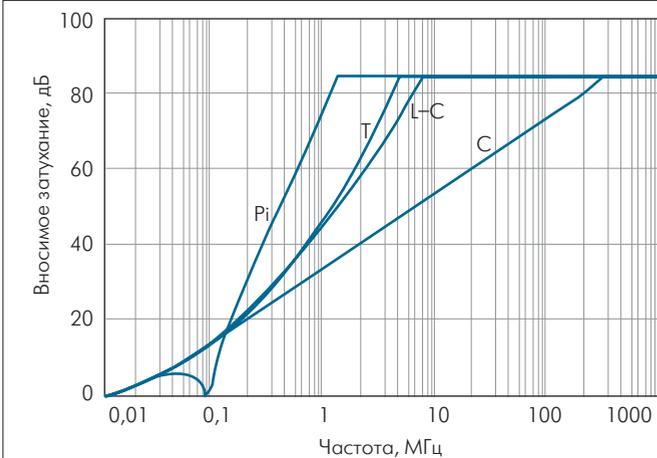
сованной линии, импеданс индуктивности и реактивного сопротивления нагрузки на некоторых частотах может не соответствовать заданному. Поэтому правильнее при выборе схемы помехоподавляющего L-С-фильтра рассматривать случай низкого импеданса источника питания и высокого импеданса нагрузки (рис. 1в) [1].

*Pi-фильтр* (рис. 1д) содержит два емкостных и один индуктивный элементы. Наличие второго конденсатора значительно улучшает параметры подавления ЭМП. Фильтры с такой электрической схемой целесообразно применять при низких значениях импедансов источника и нагрузки. Не рекомендуется использовать их в цепях коммутации.

*T-фильтр* (рис. 1е) состоит из двух индуктивных и одного емкостного элементов. Он, напротив, часто используется в цепях коммутации. Применение фильтра предполагает высокие импедансы входа и выхода.

Из сравнения частотных зависимостей вносимого затухания фильтров, построенных на основе различных электрических схем, следует, что самая низкая эффективность подавления ЭМП у С-схемы, самая высокая – у Pi-схемы (рис. 2) [8]. На частотах, превышающих 100 МГц, величина вносимого затухания L-С-фильтров на 10–15 дБ больше, чем у С-фильтров (рис. 3). Следует отметить, что величины вносимого затухания аналогичных фильтров других фирм отличаются от приведенных на рис. 3, что объясняется, прежде всего, различием методов измерения.

Фильтры всех рассмотренных типов имеют **коаксиальную конструкцию**, основные элементы которой – проходной трубчатый или многослойный дисковый конденсатор и безвитковый дроссель в виде центрального токонесящего проводника, окруженного магнитопроводом (трубкой) из термостабильного феррита. Конструкция отличается стабильностью величин емкостного и индуктивного сопротивлений в



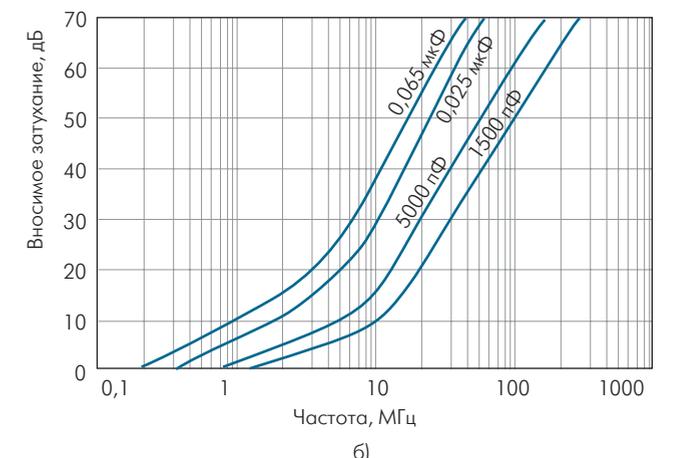
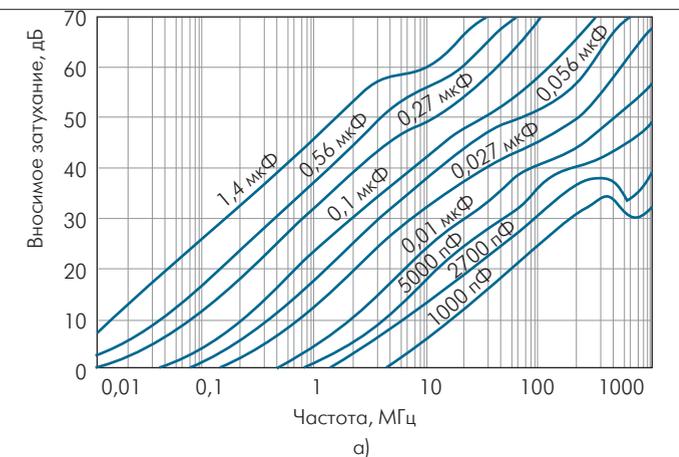
**Рис. 2. Частотные зависимости вносимого затухания фильтров, построенных на различных электрических схемах (данные фирмы Spectrum Control) [8]**

широкой полосе частот. Использование конденсаторов проходного типа обусловлено их минимальной собственной индуктивностью (на СВЧ индуктивное сопротивление конденсатора может даже превосходить его емкостное сопротивление).

Электрическая емкость конденсатора определяет основные параметры фильтра: частоту среза и резонансную частоту, ширину полосы перехода, уровень вносимого затухания в полосе

задержания. Чем больше величина электрической емкости, тем ниже частота среза и резонансная частота, уже ширина полосы перехода и выше уровень вносимого затухания. Однако применение фильтров с большой емкостью в цепях импульсных сигналов вызывает изменение формы выходных импульсов, а также частотные и фазовые искажения входных импульсов. На низких частотах происходит скоп «крыши» импульса, на высоких частотах – возрастание длительностей фронтов нарастания и спада. В общем случае искажения формы импульсов можно избежать, если обеспечить равенство волновых сопротивлений фильтра и линии с нагрузкой. Но на практике это условие трудно реализовать.

Чтобы искажение формы выходных импульсов было минимальным, частота среза фильтра должна более чем вдвое превышать верхнюю



**Рис. 3. Частотные зависимости вносимого затухания С (а) и Pi- (б) фильтров с различными значениями емкости (данные фирмы Spectrum Control) [8]**

границу спектра частот входных импульсов [7]. Для увеличения частоты среза необходимо прежде всего уменьшить электрическую емкость фильтра. Опыт показывает, что этот параметр фильтров для цепей импульсов наносекундной длительности должен составлять 15–100 пФ. Естественно, однозвенный фильтр со столь малой электрической емкостью не может обеспечить высокую величину вносимого затухания.

Корпусом фильтра нередко служит керамический конденсатор, его металлизированная наружная обкладка используется при пайке фильтра в устройство. Но чаще применяют металлические корпуса в виде втулок с резьбой или без нее. На поверхность корпуса наносят паяемое гальваническое покрытие (золото, серебро, никель или его сплавы, сплав олово-висмут). Фильтры можно герметизировать двумя способами: заливкой обоих торцов корпуса термостойким компаундом, иногда с последующим покрытием компаунда изоляционным лаком, и с помощью обеспечивающего вакуумную плотность металlostеклянного спаива. В первом случае герметичность фильтра, характеризующаяся скоростью натекания по спаиву и материалам фильтра, не регламентируется. Во втором скорость натекания должна быть менее  $1,3 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>Па/с при проверке на гелиевом течеискателе. В современной РЭА СВЧ применяют только фильтры с такой герметизацией.

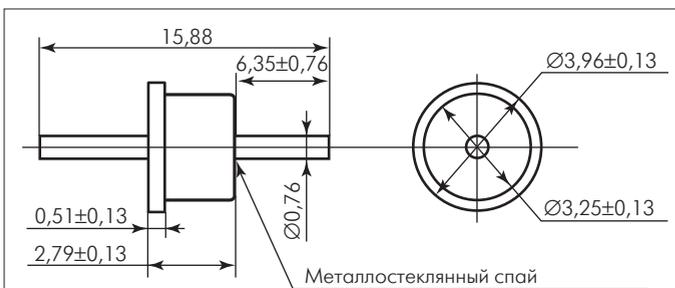
При выборе фильтра необходимо также учитывать номинальные значения его напряжения и тока, сопротивление изоляции, определяющее токи утечки, а также условия эксплуатации. Кроме того, необходимо знать конструктивные особенности, габаритные, установочные размеры и массу фильтра, вид покрытия металлических поверхностей, способ установки в устройство и допустимую температуру нагрева при монтаже.

**ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ**

Зарубежные фирмы, в том числе Spectrum Control, Maxwell (отделение Sierra Capacitor/Filter), Erie, AMP (США), Tusonix (Франция), Oxley Developments (Великобритания), MuRata MFG (Япония) и другие разрабатывают и выпускают несколько сотен типоразмеров проходных помехоподавляющих фильтров с С-, L-С- или Pi-электрической схемой. По конструктивному исполнению эти фильтры можно отнести к одному из четырех типовых вариантов:

- 1) миниатюрные безрезьбовые, герметизированные металlostеклянным спаивом, впаиваемые в корпуса устройств (Miniature Solder-in Filters, Solder-in Styles, Solder Mount);
- 2) безрезьбовые, герметизированные компаундом, впаиваемые в корпуса устройств (Solder-in Filters, Solder-in Pi Circuit, Solder Mount Pi-Filter, Eyelet Style);
- 3) резьбовые, герметизированные компаундом (Resin Sealed Bolt-in Filters, Bolt Style Epoxy Seals);
- 4) резьбовые, герметизированные металlostеклянным спаивом (Bolt Style Hermetic Filters).

Подавляющее большинство **фильтров первого типа** представляют собой С-фильтры (проходные конденсаторы) (рис.4, табл.1).



**Рис.4. Миниатюрные герметичные безрезьбовые, впаиваемые в корпуса устройств С и L-С-фильтры**

**Таблица 1. Безрезьбовые фильтры зарубежных фирм первого типа**

Фирма	Электрическая схема	Серия или номер фильтра*	Число типоразмеров	Электрическая емкость, пФ	Источник
Фильтры, герметизированные металlostеклянным спаивом					
Spectrum Control	C	SCI-9900	9	5...30000	[8]
Maxwell	C	1210	8	10–15000	–
		1610	6	1000–50000	
	L-C	1230	8	10–15000	[9]
		1630	6	4000–50000	
Tusonix	C	4300	58	5–50000	[10]
MuRata	C	MJ9900	2	100, 1200	[11]
		DFS-306-801	3	2, 100, 12000	
Фильтры, герметизированные компаундом**					
Spectrum Control	C	54-786-003	1	300000	–
		54-785-002	1	50000	
	Pi	51-703	2	1500, 5500	[8]
		51-707-002	1	1750	
		51-750	2	12000, 22000	
Tusonix	C	4302	13	5–50000	[10]
	Pi	4151	18	1500–60000	–
MuRata	Pi	MJ 1200	3	1500, 12000	[11]
		NFH 404	1	1500	
		NFS 305	2	–	
AMP	C	CA	1	4000–10000	–
		CC	1	1300–2500	
		CD	1	600–1000	
		CE	1	400–600	
		CF	1	240–360	
	L-C	DA-M	2	4000–8000	[12]
		DB-M	2	3000–5000	
		DC-M	2	1500–3000	
		DF-M	2	160–250	
		DG-M	2	80–125	
Siemens Matsushita	Pi	B85313-A-B4	1	1600	[13]

\* Приведены номера серий фильтров, представляющих наибольший интерес для РЭА СВЧ. Номера фильтров в каждой серии указаны в каталогах фирм, а также в работе [6].  
 \*\*Представлены фильтры с наименьшими габаритами. Общее число типоразмеров фильтров этого исполнения во много раз больше.

Фирма Maxwell выпускает в таком исполнении и L-С-фильтры с теми же поперечными размерами, что и у С-фильтров, но несколько большей длины. Металlostеклянный спаив располагают на одном из концов фильтра, противоположный конец некоторые фирмы герметизируют эпоксидным компаундом. На частотах более 1 ГГц увеличение емкости свыше 5000 пФ практически не влияет на величину вносимого затухания, но позволяет снизить частоту среза и уменьшить ширину полосы перехода. По данным фирмы Maxwell [9], величина вносимого затухания С- и L-С-фильтров с одинаковой электрической емкостью одна и та же во всем диапазоне частот, что, однако, противоречит данным других фирм. Основные параметры фильтров:

Электрическая емкость	... 5 пФ–1,4 мкФ (в фильтрах с повышенной емкостью применяют многослойные дисковые конденсаторы)
Разброс емкости	... 0,2% при емкости 5–100 пФ и 3 % при большей емкости
Отклонение емкости в зависимости от температуры и напряжения	... +15...–40%
Номинальное напряжение	... 50, 100 и 200 В по постоянному току или 115 В по переменному току с частотой 400 Гц (чем больше электрическая емкость, тем ниже напряжение)
Номинальный ток	... 5, 10 и 15 А
Сопротивление изоляции	... до 1 ГОм
Диапазон рабочих температур	... –55...+150°С

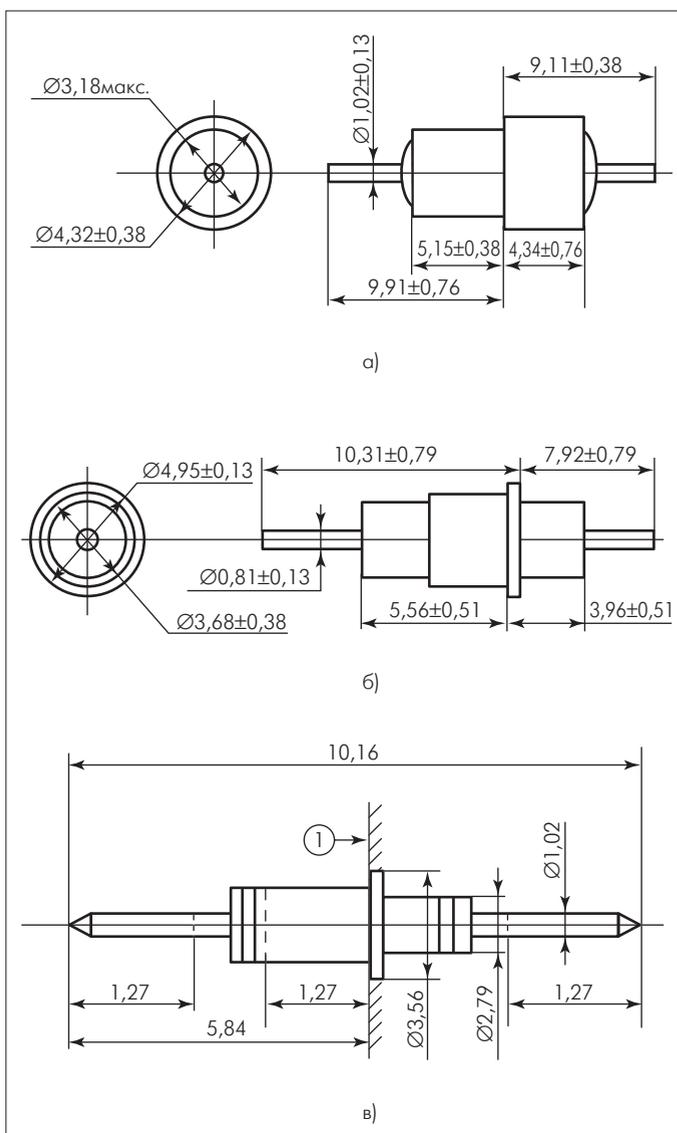
Фильтры этого типа имеют повышенную надежность и при пайке в корпуса устройств выдерживают кратковременный нагрев до температуры 300°С.

Ведущие зарубежные фирмы выпускают широкую номенклатуру **C-, L-C- и Pi- фильтров второго типа** (рис.5, табл.1). Миниатюрные проходные конденсаторы фирмы Tusonix герметизированы эпоксидным компаундом с обоих концов. Конструкция и размеры этих фильтров аналогичны приведенным на рис.4.

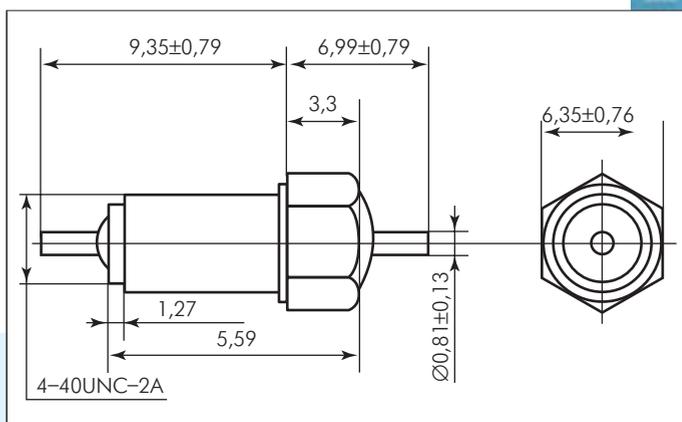
Самые миниатюрные фильтры выпускает фирма AMP. Керамический конденсатор фильтров Siemens–Matsushita служит корпусом фильтра. Для удобства крепления в корпусе устройства на конденсатор надета металлическая втулка с резьбой или без нее. Основные параметры этих фильтров:

Электрическая емкость	.....5–300000 пФ
Разброс емкости	.....3%
Отклонение емкости в зависимости от температуры и напряжения	.....+15...-40%
Номинальное напряжение	.....50, 100 и 200 В
Номинальный ток	.....5, 10 и 15 А
Сопротивление изоляции	.....до 1 ГОм
Величина вносимого затухания	.....см. рис.3
Герметичность	.....не регламентируется
Диапазон рабочих температур	.....-55...+125°C

Наиболее широко в РЭА СВЧ применяют **C-, L-C- и Pi-фильтры третьего типа**. Миниатюрные фильтры выпускают с дюймовой резь-



**Рис.5. Безрезьбовые герметизированные компаундом, впаиваемые в корпуса устройств C-фильтры фирм Spectrum Control и Tusonix (а), Pi-фильтры фирм Spectrum Control, L-C-фильтры фирм AMP**



**Рис.6. Фильтр с резьбой 4-40 UNC-2A**

бой 4-40 UNC-2A, 6-32 UNC-2A, 6-40 UNF-2A или 8-32 UNC-2A (по американской классификации), что приблизительно эквивалентно метрической резьбе М3х0,5, М3,5х0,6 и М4х0,7. Фирмы Tusonix и MuRata поставляют фильтры не только с дюймовой, но и с метрической

**Таблица 2. Герметизированные компаундом резьбовые фильтры зарубежных фирм**

Фирма	Тип резьбы	Электрическая схема	Серия или номер фильтра	Число типоразмеров	Электрическая емкость, пФ	Источник
Spectrum-Control	4-40 UNC-2A	C	9900-381	8	100–450000	
		L-C	SCI-3122	3	10000	
		Pi	SCI-3112	6	27000, 50000	
	6-32 UNC-2A	C	SCI-3102	3	75000	
		L-C	51-729	3	1500, 5500, 7000	
		Pi	54-779	6	10–100000	[8]
8-32 UNC-2A	L-C	51-726	1	22000		
	Pi	51-726	3	1500, 5500, 9000		
	L-C	51-712	2	22000, 31000		
Maxwell	4-40 UNC-2A	Pi	51-712	7	2000–30000	
		C	5010	4	1000–27000	[9]
Tusonix	4-40 UNC-2A	L-C	5030	3	10000–46000	
		C	4400	48	25–50000	
		L-C	4400-050	9	100–50000	
	6-32 UNC-2A	Pi	4261	2	2000, 5000	
		C	4402	6	5–100000	
		L-C	4402-060	2	4700, 27000	
	8-32 UNC-2A	Pi	4260	3	2000, 5500, 7500	
		C	2425	4	100–10000	[10]
		L-C	4404	3	22000–100000	
		Pi	4404-050	1	22000	
		Pi	4205	3	65, 1500	
		Pi	4201	10	1000, 5500	
MuRata	8-32 UNC-2A	Pi	4251	4	3000–30000	
		C	DFT301	3	1000, 4700, 10000	
		C	DFT304	1	3300	
		C	DF553	1	1000	
		Pi	NFT403	1	–	[11]
		Pi	NFT501	3	–	
AMP	8-32 UNC-2	L-C	MJ1283	1	12000	
		L-C	DA-M	1	4000–8000	
		L-C	DB-M	1	3000–5000	
		L-C	DC-M	1	1500–3000	[12]
		L-C	DF-M	1	160–250	
Simens Matsushita	M 6x0,5	Pi	DG-M	1	80–125	
		Pi	B85313-A-B7	1	1600	[13]
Oxley	6-32 UNC-2A	C	DLT4/C	6	330–22000	
		L-C	DLT4/L	6	330–22000	[14]
	8-32 UNC-2A	Pi	–	2	1500, 4000	

кой резьбой. Пример конструкции миниатюрного фильтра с резьбой 4-40 UNC-2A показан на рис.6 [8]. В табл. 2 приведены параметры лучших, по нашему мнению, резьбовых фильтров, герметизированных компаундом. Основные параметры фильтров этого типа:

Электрическая емкость .....25–100000 пФ  
 Разброс емкости .....0–100 %  
 Номинальное напряжение .....50, 70, 100, 200 и 300 В  
 Номинальный ток .....3, 5, 7 и 10 А  
 Сопротивление изоляции .....до 1 ГОм  
 Величина вносимого затухания .....см. рис.3  
 Герметичность .....не регламентируется  
 Диапазон рабочих температур .....-55...+125°C

Размеры и масса **резьбовых С-, L-С-, Pi- и Т- фильтров четвертого типа**, как правило, достаточно велики. Они имеют большую электрическую емкость (от десятых долей до нескольких микрофарад). Предназначены для фильтрации ЭМП на частотах выше 10 кГц [8]. Миниатюрные герметичные С- и L-С-фильтры с резьбой 4-40 UNC-2A выпускает лишь фирма Maxwell. Фирма поставяет также С- (серия 5020, 8 типоразмеров) и L-С-фильтры (серия 5040, 8 типоразмеров). Конструктивно такие фильтры мало отличаются от аналогичных устройств, герметизированных компаундом. В фильтрах фирмы Maxwell с большой электрической емкостью использованы многослойные дисковые конденсаторы. Основные электрические параметры фильтров:

Электрическая емкость .....1000-50000 пФ  
 Номинальное напряжение .....50–200 В  
 Номинальный ток .....3 А  
 Сопротивление изоляции .....более 1000 МОм  
 Величина вносимого затухания .....см. рис.3  
 Диапазон рабочих температур .....-55...+125°C

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ**

Ведущее российское предприятие по созданию промышленных керамических конденсаторов и помехоподавляющих фильтров для подавления помех в диапазоне частот от 10 кГц до 10 ГГц – НПО “Позитрон” (г. Санкт-Петербург) [15-17].

Керамические проходные конденсаторы выпускаются двух конструктивных типов: с резьбовыми втулками (КТП, КО, КДО) и с безрезьбовыми втулками для крепления пайкой в устройства (К10П-4, К10-51) [15]. Конденсаторы имеют следующие параметры:

Электрическая емкость .....3,3–6800 пФ  
 Температурный коэффициент емкости .....-1500x10<sup>-6</sup> ... +100x10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>  
 Номинальное напряжение .....350– 800 В  
 Номинальный ток .....10 и 15 А  
 Сопротивление изоляции .....не менее 10000 МОм (4000 МОм для К10-51)  
 Величина вносимого затухания .....не регламентируется  
 Герметичность .....не регламентируется  
 Диапазон рабочих температур .....-60...+125°C  
 Срок сохраняемости .....12 лет  
 Срок сохраняемости паяемости выводов без дополнительного облуживания ..12 месяцев

**Таблица 3. Геометрические размеры, масса и электрические параметры фильтров Б7-2, Б14, Б23 и Б23А**

Тип фильтра	Номинальная емкость, пФ	Геометрические размеры, мм (см. рис.7)			Масса, г, макс.	Рабочий диапазон частот, ГГц	Минимальное вносимое затухание, дБ					
		L	I	D			0,1 ГГц	1,0 ГГц	1,5 ГГц	4,0 ГГц	6,0 ГГц	10 ГГц
Б7-2	4700	12	–	6	4,0	0,1–1,5	35	35	35	–	–	–
Б14	2200, 3300, 4400	12	7	–	4,0	0,1–1,5	40	40	40	–	–	–
Б23	2200,3300	12	7	–	6,0	0,1–6,0	45	45	45	40	40	–
	4700,6800	25	14	–	2,0							
Б23А	1000	10	–	5	2,0	0,1– 10,0	45	45	45	45	40	40
	1500	12		–	0,5							

Минимальная наработка на отказ .....15000 ч  
 Масса .....1,5 (КО-1, КДО-1) – 6 г (КТП-3)

В НПО “Позитрон” разработаны также *проходные Pi-фильтры* типов Б7-2, Б14, Б23, Б23А, герметизированные специальным компаундом [16–17]. Фильтры Б14 и Б23 предназначены для резьбового паяного соединения с корпусом устройства по металлизированным контактным поверхностям (рис.7, табл. 3). Следует подчеркнуть, что величина вносимого затухания определена в измерительной схеме с волновым сопротивлением 75 Ом. Фильтры имеют следующие параметры:

Изменение электрической емкости ... менее 30 %  
 Номинальное напряжение .....250 В (Б7-2, Б23), 300 В (Б23) и 500 В (Б14)  
 Номинальный ток .....5 А (Б7-2, Б14, Б23), 10 А (Б23А емкость 1000 пФ), 15 А (Б23А, емкость 1500 пФ)  
 Сопротивление изоляции .....более 30 МОм  
 Герметичность .....не регламентируется  
 Срок сохраняемости .....20 лет (12 лет для Б7-2)  
 Минимальная наработка на отказ ....10000–15000 ч  
 Диапазон рабочих температур .....-60...+125°C

Из-за больших габаритных размеров и массы конденсаторы и фильтры, разработанные НПО Позитрон, можно считать миниатюрными лишь условно. К тому же, допустимая температура нагрева при их пайке в корпуса устройств низка, а герметичность недостаточна.

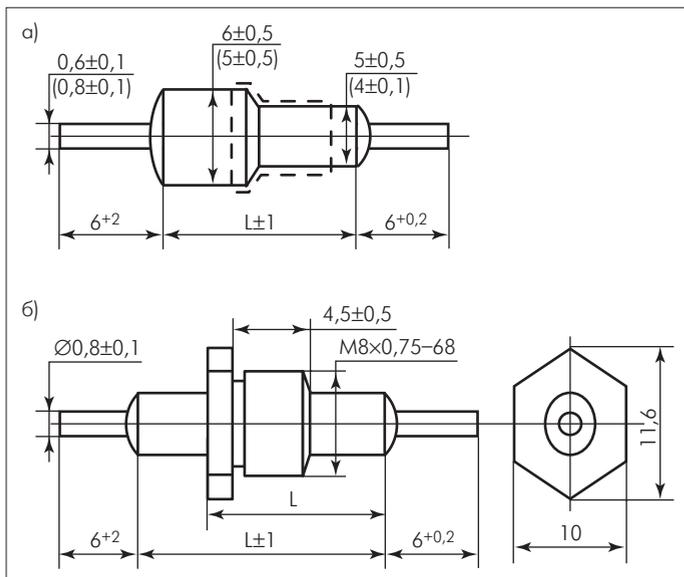
Поэтому в конце 80-х годов ряд предприятий провели работы по совершенствованию фильтров [6]. В результате в ГНПП “Исток” разработана серия миниатюрных герметичных L-С-фильтров для подавления ЭМП в цепях питания и управления РЗА СВЧ (рис.8). Разработанные фильтры по комплексу параметров не уступают зарубежным аналогам:

Герметичность .....1,3.10<sup>-11</sup> м³Па/с  
 Сопротивление изоляции .....5000 МОм  
 Допустимая температура кратковременного нагрева .....340°C  
 Номинальное напряжение .....150 В  
 Номинальный ток .....5 А  
 Диапазон рабочих температур .....-60... +125°C  
 Масса .....0,5 г (фильтры №№ 1–9,11,12), 1,4 г (фильтр № 10)

Фильтры герметизированы металлоглазным спаем. Их отличительная особенность – отсутствие в конструкции каких-либо органических материалов, благодаря чему допустимая температура кратковременного нагрева достигает 340°C. Разработаны восемь типоразмеров миниатюрных безрезьбовых, три типоразмера резьбовых и кабельные (для подвода питающего напряжения при помощи коаксиального кабеля) фильтры (табл. 4).

**КАК ВЫБРАТЬ ФИЛЬТР?**

Прежде всего следует определить частотный диапазон, в котором необходимо ослабить электромагнитные помехи. Это значит установить минимальную частоту, начиная с которой фильтр должен подавлять помехи. Такая частота эквивалентна частоте среза фильтра. Таким образом, выбор фильтра начинают с определения его частоты среза. Правильный выбор по этому параметру особенно важен для аппаратуры, работающей с низким уровнем сигналов.



**Рис.7. Общий вид фильтров Б7-2, Б23А (а) и Б23 (б). В скобках приведены размеры контактной поверхности**

Второй шаг – определение необходимой величины вносимого затухания в установленном диапазоне.

Третий – установление величины электрической емкости фильтра. Емкость фильтров, используемых в цепях питания постоянного тока, должна быть по возможности большой – по нашему мнению, не менее 1500 пФ. Емкость фильтров, используемых в цепях импульсных сигналов, не должна превышать 100 пФ.

Четвертый шаг – определение таких параметров фильтра, как значения номинальных напряжения и тока и их допустимые изменения в условиях эксплуатации, а также показатели надежности, долговечности и сохраняемости.

И наконец, проводится анализ конструктивных особенностей фильтра – рассматриваются его габаритные, присоединительные и установочные размеры, масса, герметичность, а также способ монтажа в корпус устройства (вид соединения с корпусом, требуемая толщина стенки корпуса, допустимая температура нагрева при пайке и др.), способ соединения его выводов с элементами электрической схемы.

Одна из важнейших характеристик фильтра – его цена. При прочих равных условиях более низкая цена – решающий фактор при выборе фильтра. При покупке импортных фильтров необходимо учитывать, что с увеличением объема заказываемой партии цена фильтра заметно снижается.

В современной РЭА СВЧ необходимо применять фильтры, выпускаемые в соответствии с военными стандартами. Хотя такие фильтры дороже фильтров гражданского назначения, они превосходят их по комплексу параметров, выдерживают более жесткие условия эксплуатации, более надежны и долговечны.

### КАК УСТАНОВИТЬ ФИЛЬТР В РЭА?

Процесс установки фильтров в корпуса РЭА включает монтаж в корпус и соединение выводов фильтров с элементами электрической схемы.

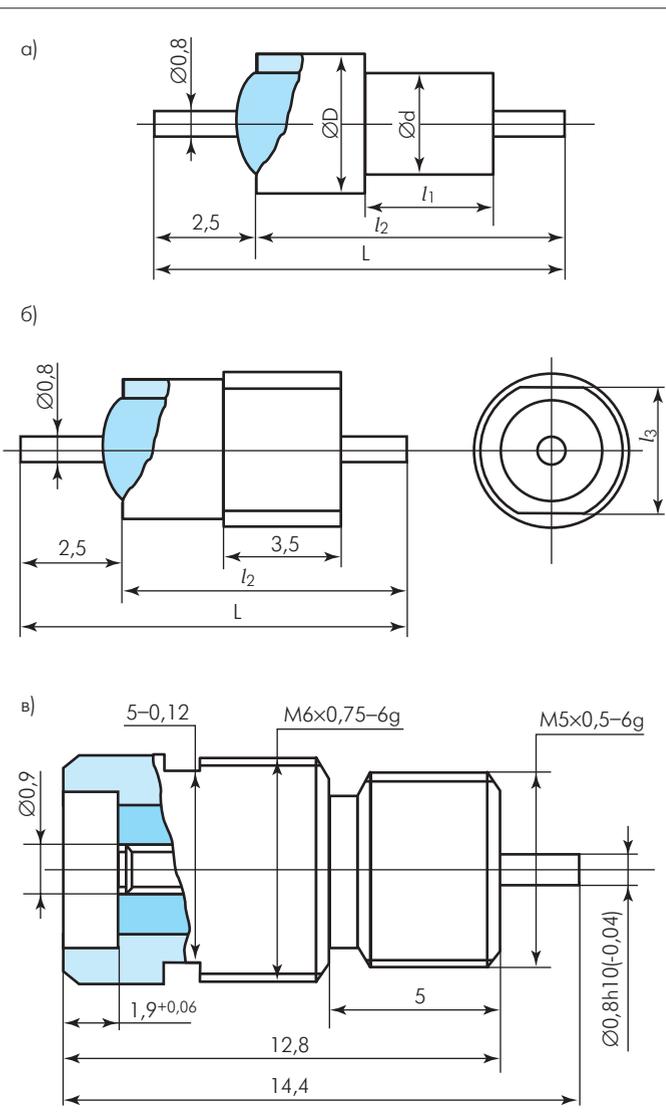
Монтаж должен обеспечить надежный электрический контакт фильтра с изделием, необходимую герметичность и механическую прочность крепления, а также исключить резонансные явления при воздействии вибраций. В зависимости от конструкции фильтра и корпуса изделия, а также от требований к герметичности соединения монтаж производится:

- резьбовым соединением с закреплением фильтра с обратной стороны при помощи гайки и шайбы;
- низкотемпературной пайкой;
- приклеиванием электропроводящими клеями.

При установке фильтров в герметизированную аппаратуру допустима только пайка. Для того чтобы она была надежной, на корпус изделия наносят одно из следующих покрытий: Хим.Н18.0-Ви(99,7)6, Хим.Н18.Н1.Пд-Н(80)1, Хим.Н18.(Н-Б)6, серебро, золото. Корпуса и выводы фильтров покрывают золотом, серебром, сплавами О-Ви(99,7)6, Пд-Н(80)6 или (Н-Б)6. Номенклатура припоев определяет требования обеспечения низкой допустимой температуры нагрева (180–230°C) фильтров большинства типов. Наиболее часто применяются припои ПОС-61 (температура плавления 183–190°C), ПОСК 50-18 (температура плавления 142–145°C) и паяльные пасты на их основе.

Для фильтров, герметизированных металлостеклянным спаем, допустима пайка более высокотемпературными припоями типа ПСр1,5 (температура плавления 273–280°C). В этом случае пайка в восстановительной среде водорода не требует применения флюса и обеспечивает более высокую механическую прочность соединения.

Чаще всего отдают предпочтение флюсовой пайке на воздухе или в защитной среде паяльными пастами на основе припоя ПОС-



**Рис.8. Помехоподавляющие безрезьбовые (а), резьбовые (б) и ка-  
пельные (в) фильтры ГНПП "Исток"**

Таблица 4. Основные параметры фильтров ГНПП "ИСТОК"

№ п.п	Обозначение фильтра	Емкость, пФ, мин	Изменение вносимого затухания с частотой					Геометрические размеры*, см						
			0,01 ГГц	0,1 ГГц	1,0 ГГц	10 ГГц	18 ГГц	D	D	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	L	I <sub>3</sub>	M
1.	ТС2.263.017	5000	20	35	55	60	65	4,0	3,4	4,0	–			M4x0,5
2.	ТС2.263.017-01	5000	20	35	55	60	65	4,0	–		8,0	13,0	3,2	
3.	ТС2.263.017-02	5000	20	35	55	60	65	4,0	3,4	6,0		14,5		
4.	КРПГ433553.001	3000	15	30	50	60	60	4,0	–	–			3,5	
5.	КРПГ433553.001-01	3000	15	30	50	60	60	4,0	3,4	2,5	6,0	10,0	–	M4x0,5
6.	КРПГ433553.001-02	3000	15	30	50	60	60	4,0	3,4	3,5			–	
7.	КРПГ433553.002	2500	13	25	45	55	60	3,2	2,6	3,5	6,0	10,0	–	–
8.	КРПГ433553.002-01	2500	13	25	45	55	60	3,0	–	–	6,0	10,0	2,5	–
9.	КРПГ433553.002-02	1500	10	20	40	50	60	3,2	2,6	1,4	4,0	8,0	–	M3x0,5
10.	КРПГ433553003	3000	15	30	50	60	60	См. рис.8						–
11.	КРПГ433553.005	100				30	35	4,0	3,4	2,5	6,0	13,0	–	–
12.	КРПГ433553.005-01	50	–	–	20	25	30	4,0	3,4	2,5	6,0	13,0	–	–

\* См. рис.8

61, особенно при резьбовом соединении фильтра с корпусом устройства. Применяемые пасты содержат 75–80% порошкообразного припоя, 2–8% флюсующего компонента, остальное – связующие компоненты. Из всех опробованных паст лучшей, по нашему мнению, является водорастворимая паяльная паста ППВ-190 [18]. Она активна при пайке по никелевым покрытиям и обеспечивает получение коррозионно-стойких и достаточно прочных (40–43 МПа) соединений. Пайку производят при температуре 190–230°C в течение 15–60 секунд. Остатки флюса после пайки легко смываются водой с применением или без применения ультразвука. После промывки необходима сушка при температуре 80–100°C в течение нескольких минут.

При установке герметизированных компаундом фильтров в герметичную аппаратуру иногда используют следующий прием. Фильтры устанавливаются в шлюзовой отсек корпуса устройства, а герметичность обеспечивает соединенный с фильтром металлотеклянный ввод, впаиваемый в корпус устройства.

Выводы фильтров соединяются с элементами электрической схемы с помощью привариваемых или припаяваемых проводников или перемычек.

При использовании фильтров, герметизированных органическими компаундами, следует избегать перегрева выводов. Облуживание и пайка должны производиться низкотемпературными припоями только с бескислотными флюсами. Для фильтров, герметизированных металлотеклянным спаем, во избежание нарушения герметичности из-за образования микротрещин в стеклянном изоляторе не допускается:

- попадание капель припоя на изолятор при пайке;
- контактная сварка "напроход" по центральному проводнику при приварке к нему проводника или перемычки (рекомендуются сварка расщепленным электродом, лазерная сварка, пайка);
- попадание сварочных выплесков на стеклянный изолятор и касание его сварочным электродом.

Из вышеизложенного можно сделать следующие **выводы**. Рассмотренные фильтры для подавления паразитных сигналов в цепях питания и управления эффективно фильтруют межсистемные и внутрисистемные ЭМП и обеспечивают "развязку по СВЧ" в современной РЭА. За рубежом разработана и выпускается широкая номенклатура фильтров. К сожалению, в нашей стране в последние 15 лет новые радиокомпоненты (помехоподавляющие фильтры, соединители, коаксиально-микрополосковые переходы, вводы) для современной РЭА СВЧ практически не разрабатывались. И сегодня в этой области мы серьезно отстаем от ведущих

зарубежных фирм. Однако необходимые предпосылки для развития этого приоритетного направления в стране еще сохранились. Можно надеяться, что при вложении инвестиций в эту область техники отечественная РЭА СВЧ будет полностью базироваться на отечественных радиокомпонентах.

Автор выражает благодарность Н.А.Бабинцевой и Ю.В.Карпову за помощь в подготовке этой статьи к публикации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1981. – 295 с.
2. Князев А.Д., Кочиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
3. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. – М.: Высшая школа, 1990. – 432 с.
4. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т.1/ Пер. с англ./Под ред. Алексеева Л.В. и Кушнира Ф.В. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
5. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах/Пер. с англ./Под ред. Гальперина М.В. – М.: Мир, 1979. – 317 с.
6. Джурицкий К.Б. Зарубежные и отечественные миниатюрные фильтры нижних частот для подавления помех в РЭА СВЧ: Справочные материалы по электронной технике: ГНПП "Исток", 1998. – 41 с.
7. Самойлов В.Ф., Маковеев В.Г. Импульсная техника. 3-е изд. – М.: Связь, 1971. – 224 с.
8. EMI Filtering Product Guide. Innovative EMC Solutions. Каталог фирмы Spectrum Control Inc. ISO.9001. 1997.
9. Каталог фирмы Maxwell Technologies Energy Product (Sierra-KD Components), 2000.
10. EMI/RFI Filters. Каталог 4000R3 фирмы Tusonix, Inc.
11. '88 MuRata Products. Каталог фирмы. MuRata MFG Co. Ltd, 1988.
12. AMP Filters and Filtered Connectors. Каталог 82061 фирмы AMP Inc., 10/1994.
13. EMC Components. Short Form Catalog Siemens Matsushita Components, 1997.
14. Electronic Components. Проспект фирмы Oxley Developments Co, Ltd, 1988.
15. Конденсаторы: Справочник / Четвертков И.И., Дьяконов М.Н., Присняков В.И. и др. /Под ред. Четверткова И.И. и Дьяконова М.Н. – М.: Радио и связь, 1993. – 392 с.
16. Фильтры керамические Б7. Технические условия ОЖО.206.005ТУ, 1977.
17. Фильтры проходные Б14, Б23, Б23А, Б23Б. Технические условия ОЖО.206.021 ТУ, 1974.
18. Пат. 1808590 РФ, МКИ В 23К 35/24. Паста для низкотемпературной пайки/В.Ф. Шиханов, Н.П.Литвиненко (РФ). – Оpubл. в Бюл. № 14, 1993; Приоритет 9.07.90.