

**К. ДЖУРИНСКИЙ**

# **Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ**

**Соединители,  
коаксиально – микрополосковые переходы,  
адаптеры, СВЧ – вводы, низкочастотные вводы,  
изоляционные стойки, фильтры помех**



**RadioHata.RU**



**Компания ООО "Амитрон электроникс"**  
производит радиочастотные коаксиальные  
соединители согласно ГОСТ 20265-83,  
ГОСТ 20465-85, ГОСТ 13317-89 и стандартов  
MIL-C-39012, IEC, NFC 93650, DIN и т.д.

Компания производит 30 серий различных  
соединителей с присоединительными размерами  
7/3,04 мм, 3,5/1,52 мм, 6/2,6 мм и каналами типа  
N, 7/16, TNC и т.д., а также герметичные и не герме-  
тичные микрополосковые переходы с присоеди-  
нительными размерами 3,5/1,52 мм и 7/3,04 мм  
по ГОСТ 20265-83.

ООО "Амитрон электроникс" принимает заказы  
на производство радиочастотных коаксиальных  
соединителей по чертежам заказчика, а также  
на разработку и производство соединителей  
согласно техническому заданию.



**ООО Амитрон электроникс**  
123592 Россия, г. Москва ул. Кулакова 20 стр.1А  
+7 495 757-96-94, +7 495 757-65-09, +7 495 750-84-11  
E-mail: [sales@ametr.ru](mailto:sales@ametr.ru) Web: [www.ametr.ru](http://www.ametr.ru)



# **М И Р** электроники

К. ДЖУРИНСКИЙ

## **Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микро– электроники СВЧ**

Соединители, коаксиально –  
микрополосковые  
переходы, адаптеры,  
СВЧ – вводы, низкочастотные  
вводы, изоляционные стойки,  
фильтры помех

Издание второе,  
исправленное и дополненное

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2006

**Джуринский К.Б.**

**Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ**  
*Соединители, коаксиально - микрополосковые переходы, адаптеры,*  
*СВЧ - вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех*  
Издание второе, исправленное и дополненное

**Москва:**

**Техносфера, 2006. – 216 с. ISBN 5-94836-095-4**

Впервые систематизированы и обобщены данные по отечественным и зарубежным коаксиальным радиокомпонентам для современной микроэлектроники СВЧ. На большом фактическом материале рассмотрены конструкция и основные параметры современных отечественных и зарубежных радиокомпонентов: коаксиально-микрополосковых переходов, кабельных соединителей, адаптеров, высокочастотных и низкочастотных вводов, изоляционных стоек, фильтров помех. Рассмотрены особенности распространения электромагнитной волны в коаксиальной линии передачи. Приведены основные формулы для расчета коаксиальных радиокомпонентов. Показаны особенности применения радиокомпонентов в современной микроэлектронике СВЧ. Даны рекомендации по их выбору и установке в изделия СВЧ.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся разработкой, конструированием и производством РЭА СВЧ для использования в качестве справочных материалов. Она может быть также полезна преподавателям, аспирантам и студентам радиотехнических специальностей.

© К.Б. Джуринский  
© 2006, ЗАО "РИЦ "Техносфера",  
оригинал-макет, оформление

**ISBN 5-94836-095-4**



# Содержание

<b>Введение. Значение коаксиальных радиокомпонентов в микроэлектронике СВЧ</b> .....	<b>11</b>
<b>Термины и их определение</b> .....	<b>13</b>
<b>Глава 1.</b>	
<b>Электромагнитные волны в линиях передачи</b> .....	<b>16</b>
1.1. Сверхвысокие частоты .....	16
1.2. Радиочастотные линии передачи .....	17
1.3. Типы волн в коаксиальной линии .....	18
<b>Глава 2.</b>	
<b>Основные характеристики коаксиальной линии</b> .....	<b>22</b>
2.1. Экранированность коаксиальной линии .....	22
2.2. Волновое сопротивление .....	23
2.3. Коэффициент отражения .....	25
2.4. Коэффициент стоячей волны .....	26
2.5. Типовые режимы в коаксиальной линии .....	27
2.6. Емкость, индуктивность, сопротивление и проводимость линии .....	29
2.7. Активные потери .....	32
<b>Глава 3.</b>	
<b>Миниатюрные коаксиальные СВЧ-вводы</b> .....	<b>34</b>
3.1. Конструкция .....	34
3.2. Расчет параметров .....	35
3.3. Волновое сопротивление и КСВН .....	36
3.4. Высокочастотные потери .....	39
3.5. Зарубежные и отечественные СВЧ-вводы .....	40
<b>Глава 4.</b>	
<b>Радиочастотные соединители: назначение, основные требования, классификация</b> .....	<b>43</b>
4.1. Назначение коаксиальных соединителей .....	43
4.2. Основные требования к соединителям .....	44
4.3. Классификация зарубежных соединителей .....	48
4.3.1. Предельная частота .....	49
4.3.2. Особенности конструкции .....	49
4.3.3. Соединение с ответной частью .....	52
4.3.4. Кабель. Способ заделки в соединители .....	54
4.3.5. Герметичность .....	56
<b>Глава 5.</b>	
<b>Общие вопросы конструирования и изготовления соединителей</b> .....	<b>58</b>
5.1. Обеспечение надежности контактирования соединителей розетка и вилка .....	58
5.2. Конструирование изоляторов соединителей .....	63

5.3. Материалы и покрытия .....	65
5.4. Способы крепления внутреннего проводника и изолятора в корпусе соединителя ... ..	68

## **Глава 6.**

<b>Зарубежные соединители сантиметрового диапазона .....</b>	<b>70</b>
6.1. Соединители SMA .....	70
6.2. Соединители SMC .....	78
6.3. Соединители N .....	79
6.4. 3,5-мм соединители .....	82

## **Глава 7.**

<b>Миниатюрные, микроминиатюрные и ультраминиатюрные соединители.....</b>	<b>84</b>
7.1. Назначение соединителей .....	84
7.2. Миниатюрные соединители .....	85
7.2.1. Соединители SMB .....	85
7.2.2. Соединители MCX .....	87
7.3. Микроминиатюрные соединители .....	88
7.3.1. Соединители MMT .....	88
7.3.2. Соединители MMS .....	89
7.3.3. Соединители MMBX .....	90
7.3.4. Соединители MMCX .....	91
7.4. Ультраминиатюрные соединители .....	92
7.4.1. Соединители IMP .....	92
7.4.2. Соединители UMP .....	94

## **Глава 8.**

<b>Соединители миллиметрового диапазона .....</b>	<b>95</b>
8.1. 2,9-мм соединители .....	95
8.2. Особенности конструкции 2,9-мм соединителей .....	98
8.3. Современное состояние .....	99
8.4. 2,9-мм коаксиально-микрополосковые переходы .....	100
8.5. Микроминиатюрные соединители SMP и GPO .....	104
8.6. Соединители OS-50 .....	107

## **Глава 9.**

<b>Соединители для диапазона частот 50–110 ГГц .....</b>	<b>108</b>
9.1. Параметры воздушных коаксиальных линий соединителей .....	108
9.2. 2,4-мм соединители .....	108
9.3. 1,85-мм соединители .....	111
9.4. VP- и GPPO- соединители .....	113
9.5. 1,0-мм соединители .....	114
9.6. Некоторые итоги .....	116

**Глава 10.**

<b>Отечественные соединители.....</b>	<b>117</b>
10.1. Соответствие отечественных и зарубежных соединителей .....	117
10.2. Отечественные производители радиочастотных соединителей .....	118
10.2.1. Соединители ФГУП ПО «Октябрь» .....	118
10.2.2. Соединители ОАО ЦНИИИА .....	122
10.2.3. Соединители ФГУП НИПИ «Кварц» .....	123
10.2.4. Соединители НПП «Спецкабель» .....	125
10.2.5. Соединители ФГУП «НПП «Исток» .....	127

**Глава 11.**

<b>Зарубежные и отечественные коаксиальные адаптеры.....</b>	<b>130</b>
11.1. Назначение и область применения адаптеров .....	130
11.2. Зарубежные «SMA in-series» адаптеры .....	132
11.3. Отечественные адаптеры .....	135

**Глава 12.**

<b>Низкочастотные входы и изоляционные стойки .....</b>	<b>141</b>
---	------------

**Глава 13.**

<b>Миниатюрные фильтры для подавления помех в цепях питания .....</b>	<b>145</b>
13.1. Электромагнитные помехи и методы их подавления .....	145
13.2. Принцип действия, основные параметры, электрические схемы, элементы конструкции фильтров нижних частот .....	146
13.3. Помехоподавляющие фильтры зарубежных фирм .....	153
13.4. Отечественные фильтры .....	159

**Глава 14.**

<b>Миниатюрные фильтры для подавления помех в цепях управления .....</b>	<b>166</b>
14.1. Назначение и основные требования к фильтрам .....	166
14.2. Влияние фильтра на параметры импульса .....	166
14.3. Спектральный состав импульса. Условие прохождения импульса без искажений .....	168
14.4. Вносимое затухание фильтров .....	170
14.5. Зарубежные фильтры .....	170
14.6. Отечественные фильтры .....	173

**Глава 15.**

<b>Сравнение отечественных и зарубежных помехоподавляющих фильтров ....</b>	<b>175</b>
15.1. Критерии сравнения .....	175
15.2. Миниатюрность .....	175
15.3. Герметичность .....	177
15.4. Вносимое затухание в заданном диапазоне частот .....	177

15.5. Особенности конструкции фильтров. Допустимая температура нагрева при пайке в корпуса изделий .....	178
15.6. Стоимость фильтров.....	179
15.7. Альтернатива миниатюрным герметичным зарубежным фильтрам ..	180
15.8. Оценка основных направлений разработок серийно выпускаемых фильтров .....	180
15.9. Подводя итоги.....	181
<b>Глава 16.</b>	
<b>Установка радиокомпонентов в изделия с микрополосковыми линиями .....</b>	<b>182</b>
16.1. Монтаж радиокомпонентов .....	182
16.2. Область перехода с МПЛ на КМПП или СВЧ-ввод .....	183
16.3. Установка КМПП в корпус изделия .....	184
16.4. Установка платы с МПЛ в корпус изделия .....	187
16.5. Соединение центрального проводника КМПП с МПЛ .....	188
16.6. Результаты экспериментальной проверки .....	192
16.7. Установка фильтров и низкочастотных вводов .....	194
<b>Глава 17.</b>	
<b>Технология установки радиокомпонентов в изделия.....</b>	<b>196</b>
17.1. Технология герметизации.....	196
17.2. О директиве RoHS .....	199
17.3. Соединение выводов радиокомпонентов с элементами электрической схемы .....	200
<b>Глава 18.</b>	
<b>Как выбрать радиокомпонент.....</b>	<b>202</b>
18.1. Отечественный или зарубежный? .....	202
18.2. Выбор соединителя.....	204
18.3. Выбор фильтра.....	204
<b>Заключение .....</b>	<b>206</b>
<b>Приложение.....</b>	<b>207</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>208</b>
<b>Об авторе .....</b>	<b>215</b>



# RadioHata.RU

## Портал радиолюбителя

[Радиотехнические журналы](#)

[Журнал Радио](#)

[Программы для радиолюбителя](#)

[Начинающему радиолюбителю](#)

[Телевидение и Радио](#)

[Источники питания](#)

[Для дома и быта](#)

[Прием-передача](#)

[Полезное видео](#)

[Автомобилелю](#)

[Аудиотехника](#)

[Arduino / Raspberry](#)

[Разное](#)

# ВВЕДЕНИЕ

## ЗНАЧЕНИЕ КОАКСИАЛЬНЫХ РАДИОКОМПОНЕНТОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ СВЧ

Технический уровень современной отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) определяет способность государства решать задачи технологической, информационной и экологической безопасности. Между тем в настоящее время соотношение импортной и отечественной ЭКБ составляет 65:35. Поставлена задача к 2011 году довести это соотношение до 30:70, т.е. обеспечить существенное развитие отечественной ЭКБ [1].

Значительную часть ЭКБ составляют коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Это обусловлено следующим обстоятельством. При разработке современных генераторных, усилительных и преобразовательных модулей, радиотехнических блоков и устройств радиоэлектронной аппаратуры СВЧ (РЭА СВЧ) большое значение имеет техника передачи сигналов без искажений и потерь с микрополосковой линии (МПЛ) на радиочастотный кабель или на другую МПЛ, подвода напряжений питания и управляющих сигналов, а также фильтрации межсистемных и внутрисистемных помех. В составе РЭА СВЧ доля радиокомпонентов, обеспечивающих эти функции, в настоящее время весьма велика – до 20%.

Упрощенная классификация коаксиальных радиокомпонентов для микроэлектроники СВЧ представлена на рис.1.В.

Важнейшими компонентами РЭА СВЧ являются радиочастотные соединители, обеспечивающие эффективный ввод и вывод СВЧ-сигналов. Тип вывода (коаксиальный, волноводный или полосковый) определяется



Рис.1.В. Классификация радиокомпонентов



рабочим диапазоном частот, величинами КСВН и прямых потерь, требованиями к радиогерметичности, надежности, а также технологичностью в изготовлении, удобством в эксплуатации и стоимостью. В настоящее время в устройствах микроэлектроники СВЧ, где не требуется высокий уровень мощности, наиболее широко применяются коаксиальные соединители. К ним относятся коаксиально-микроразветвляющиеся переходы, выводы энергии, кабельные и приборно-кабельные соединители и адаптеры, а также СВЧ-вводы.

В связи с необходимостью подавления электромагнитных помех в большинстве современных устройств микроэлектроники СВЧ применяют фильтры нижних частот в цепях питания и управляющих сигналов. Кроме фильтров широко используют герметичные одиночные и многовыводные вводы напряжений питания и низкочастотных сигналов, а также изоляционные стойки.

Все рассмотренные радиокомпоненты представляют собой участок коаксиальной линии передачи. Поэтому для понимания особенностей их конструкции и условий эффективного применения в устройствах СВЧ необходимо рассмотреть основы теории распространения электромагнитных волн в линиях передачи. В основе этой теории лежат фундаментальные уравнения Максвелла. Теоретические вопросы распространения электромагнитных волн в линиях передачи исследованы в большом числе отечественных и зарубежных работ [2–10]. Ниже рассмотрены лишь отдельные, необходимые для понимания работы радиокомпонентов, вопросы теории. При этом основное внимание уделено физическим представлениям о процессах, происходящих в линии передачи.

## ТЕРМИНЫ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

**Радиоэлектронная аппаратура СВЧ (РЭА СВЧ)** – широкий класс изделий, в которых использованы преимущественно электромагнитные сигналы для передачи, приема, преобразования и хранения информации.

**Блок СВЧ** – устройство, состоящее из одного или нескольких модулей СВЧ, функциональных узлов и линии передачи СВЧ.

**Функциональный узел СВЧ** – сборочная единица или деталь, выполняющая одну или несколько радиотехнических функций и предназначенная для работы в составе модуля или блока СВЧ.

**Плата интегральной схемы (ИС)** – часть подложки гибридной (пленочной) ИС, на поверхности которой созданы пленочные элементы, межэлементные и межкомпонентные соединения и контактные площадки.

**Подложка ИС** – основание, предназначенное для нанесения на него элементов ИС, гибридных и пленочных межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок в едином технологическом цикле.

**Линия передачи** – устройство, ограничивающее область распространения электромагнитных волн и направляющее поток электромагнитной энергии в заданном направлении.

**Однородная линия передачи** – линия передачи, поперечное сечение и электромагнитные свойства заполняющих сред которой неизменны в продольном направлении.

**Неоднородная линия передачи** – линия передачи, размеры поперечного сечения которой изменяются в продольном направлении.

**Коаксиальное устройство** – устройство, основанное на линии передачи (полосковой, коаксиальной, микрополосковой) и имеющее входы и выходы, выполненные в виде коаксиальных соединителей (разъемов).

**Радиочастотный тракт** – совокупность пассивных устройств диапазона СВЧ, сочлененных между собой.

**Радиочастотный соединитель** – электротехническое устройство, предназначенное для механического соединения и разъединения радиочастотных линий передачи сигналов и состоящее из двух или более частей (вилки, розетки), образующих разъемное контактное соединение.

**Униполярный соединитель** – соединитель, имеющий идентичные контактные стороны, образующие электрическое соединение за счет контактного нажатия на не охватываемые друг другом контактные детали.

**Переходная часть соединителя (разъем)** — часть соединителя, предназначенная для сочленения и расчленения с вилочной и розеточной частями или с частями унipoлярного соединителя.

**Коаксиально-микрополосковая переходная часть соединителя** — часть соединителя, предназначенная для соединения коаксиальной и микрополосковой линий.

**Помеха электромагнитная (ЭМП)** — нежелательное электрическое и (или) магнитное воздействие на РЭА, которое может привести к ухудшению качества его функционирования.

**Межсистемные ЭМП** — помехи, источник которых находится в системе, не относящейся к рассматриваемой.

**Внутрисистемные ЭМП** — помехи, источник которых находится внутри рассматриваемой системы

**Помехозащищенность** — способность РЭА противостоять воздействию внешних и внутренних ЭМП.

**Электромагнитная совместимость (ЭМС)** — способность РЭА функционировать совместно и одновременно с другими РЭА при возможном воздействии ЭМП, не создавая при этом недопустимых помех другим РЭА.

**Фильтрация** — способ ослабления напряжений и токов помех с помощью устройств, вносящих затухание в заданной полосе частот.

**Фильтр** — устройство для разделения сигналов и помех или ослабления помех путем внесения затухания в заданной полосе частот.

**Полоса пропускания фильтра** — область частот, в которой ослабление фильтра равно или менее заданного значения.

**Полоса задержания фильтра** — область частот, в которой ослабление фильтра равно или более заданного значения.

**Частота среза фильтра** — частота, на которой вносимое затухание фильтра не превышает 3 дБ.

**Резонансная частота фильтра** — самая низкая частота, при которой полное сопротивление фильтра минимально и является чисто активным.

**Полоса перехода** — область частотного диапазона, определяющая границы полос пропускания и задержания.

**Вносимое затухание фильтра ( $\alpha_{\text{вб}}$ )** — основной параметр фильтра, рассматриваемый в децибелах как отношение напряжений помехи на нагрузке без фильтра ( $U_1$ ) к напряжению ( $U_2$ ) с включенным фильтром:

$$\alpha_{\text{вб}} = 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_2}.$$

**Номинальные параметры радиокомпонентов** — величины параметров, указываемые в нормативно-технической документации, при которых радиокомпоненты могут работать в заданных условиях в течение срока службы.

**Сопротивление изоляции радиокомпонента** — электрическое сопротивление изоляции между корпусом и выводом радиокомпонента, измеренное при определенном напряжении.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

### 1.1. Сверхвысокие частоты

Сверхвысокими частотами в настоящее время принято называть участок спектра электромагнитных колебаний, частоты которых расположены между 3 и 30 ГГц [2]. Этот диапазон частот соответствует сантиметровому диапазону длин волн. Частотный диапазон от 30 до 300 ГГц называют крайне высокими частотами. Он охватывает миллиметровый диапазон длин волн. Следующий, субмиллиметровый диапазон занимает весь участок спектра между миллиметровым диапазоном и диапазоном длинных инфракрасных (тепловых) волн. Диапазоны частот и длин волн приведены в таблице 1.1 [2, 3].

Таблица 1.1. Диапазоны частот и длин волн

Частота, ГГц	Наименование полос частот	Длина волны в свободном пространстве	Метрическое подразделение волн	Диапазон волн
3...30	Сверхвысокие (СВЧ)	10...1 (см)	сантиметровые	Ультракороткие (УКВ)
30...300	Крайне высокие (КВЧ)	10...1 (мм)	миллиметровые	
Более 300	-	менее 1 мм	субмиллиметровые	

В технической литературе обычно СВЧ- и КВЧ-диапазоны объединяют под общим названием СВЧ-диапазон. Это допущение будет использовано в дальнейшем изложении.

За рубежом применяют деление диапазона СВЧ на следующие поддиапазоны (частоты в ГГц): S(2...4), C (4...8), X (8...12,4), Ku (12,4...18), K (18...26), Ka (26...40), U(40...60), V(50...75), E (60...90), W (75...110) [3].

Роль диапазонов СВЧ и КВЧ возрастает в связи с ускоренным развитием различных областей науки и техники: радиолокации, радиоэлектронных систем народнохозяйственного и военного назначения, быстродействующих цифровых систем связи и обработки информации, медико-биологических систем и т.д. Например, системы радиоэлектронного контроля и управления полетами

в авиации используют частоты до 100 ГГц. Комплекс средств радиоэлектронной борьбы и управления современных стратегических бомбардировщиков (типа Б-52) обеспечивает панорамный обзор в диапазоне частот от 0,5 до 40 ГГц. Связь с космическими объектами осуществляют на частотах 10...100 ГГц [2].

Использование СВЧ и КВЧ диапазонов непрерывно расширяется в связи с интенсивным развитием СВЧ-техники.

## 1.2. Радиочастотные линии передачи

Радиочастотная линия передачи является необходимым элементом любого устройства СВЧ. Общими требованиями, предъявляемыми к такой линии, являются:

- возможность передачи широкого спектра частот,
- низкий уровень прямых потерь СВЧ (малое затухание),
- возможность передачи большой мощности при малых габаритных размерах линии,
- защищенность от внешних источников помех, отсутствие излучения собственных помех,
- простота конструкции и монтажа, удобство в эксплуатации, экономичность.

Для передачи электромагнитной энергии между отдельными элементами внутри радиоэлектронной аппаратуры СВЧ применяют 3 типа линий передачи: волноводные, полосковые и коаксиальные (рис. 1.1), каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки.

### Волноводные линии

Волноводные линии (полые металлические трубы прямоугольного, круглого или иного сечения, а также диэлектрические волноводы) имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами линий:

- простота и жесткость конструкции. Отсутствие необходимости применения поддерживающих диэлектрических опор;
- отсутствие потерь на излучение, так как электромагнитное поле заключено в трубу, толщина стенки которой превышает глубину «скин-слоя»;
- высокий уровень пропускаемой мощности;

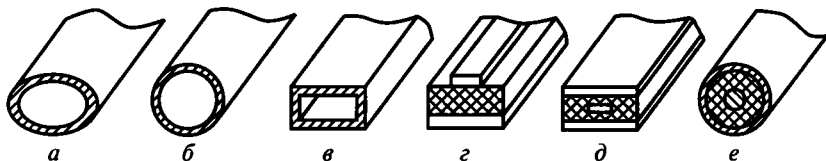


Рис. 1.1. Радиочастотные линии передачи:

*a* – эллиптический, *б* – круглый, *в* – прямоугольный волноводы, *з, д* – микрополосковые линии, *е* – коаксиальная линия



- высокая пробивная прочность;
- малые прямые потери СВЧ вследствие отсутствия внутреннего проводника. Потери в волноводах на порядок меньше, чем в воздушной коаксиальной линии.

Однако у волноводов имеются и серьезные недостатки: узкополосность и неудобство технического обслуживания. Для полного перекрытия по частоте приходится использовать несколько волноводов разных сечений и применять для каждого из них свой комплект измерительной аппаратуры.

### **Полосковые линии**

Полосковые (симметричные и несимметричные) линии передачи являются наиболее миниатюрными и технологичными в изготовлении. Они имеют достаточно низкий уровень потерь СВЧ, способны пропускать электромагнитные волны в сантиметровом и миллиметровом диапазонах и более широкополосны, чем волноводы. Однако полосковые линии, как и все открытые системы, подвержены влиянию посторонних электромагнитных полей (низкая помехозащищенность) и сами влияют на работу других устройств СВЧ. К тому же возникают трудности при встраивании таких линий в радиочастотные тракты.

### **Коаксиальные линии**

Коаксиальные линии передачи (радиочастотные кабели) нашли широкое применение в устройствах микроэлектроники СВЧ, в которых не требуется высокий уровень мощности. Такие линии широкополосны и обеспечивают работу устройств СВЧ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Недостатком коаксиальной линии является высокий уровень прямых потерь СВЧ, возрастающих с увеличением частоты. Однако при небольшой длине линии этот недостаток не является решающим для ее успешного применения в устройствах микроэлектроники СВЧ и в радиоизмерительной аппаратуре. Коаксиальные линии являются экранированными и имеют высокую помехозащищенность. Их важным преимуществом является простота и удобство встраивания в радиочастотные тракты при помощи соединителей.

Коаксиальные линии передачи и коаксиальные радиокомпоненты и являются предметом рассмотрения в настоящей работе.

## **1.3. Типы волн в коаксиальной линии**

Во всякой линии передачи могут распространяться независимо друг от друга различные типы электромагнитных волн, различающихся структурой электромагнитного поля и величиной критической длины волны (критической

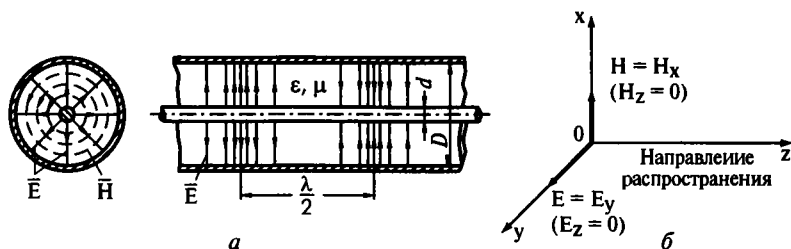


Рис. 1.2. Структура волны типа Т в поперечном сечении коаксиальной линии (а) и векторное изображение Т – волны (б)

частотой) [2-10]. Волна с наибольшей критической длиной (соответственно, с наименьшей критической частотой) называется низшей волной. В коаксиальной линии передачи низшей волной является поперечная электромагнитная волна типа Т (старое название ТЕМ-волна) (рис 1.2).

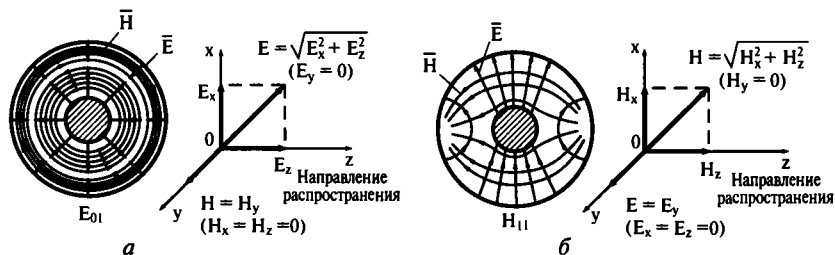
Т-волна является основным типом волн в коаксиальной линии, двухпроводной линии, а также в свободном пространстве и имеет следующие особенности:

1. Силовые линии электрического поля располагаются по радиусам, а линии магнитного поля – по окружностям (рис. 1.2, а). Векторы напряженностей электрического и магнитного полей перпендикулярны друг другу и находятся в плоскости, перпендикулярно направлению распространения волны. Продольные составляющие (в направлении распространения поля) отсутствуют (рис. 1.2, б). Напряженности электрического и магнитного полей изменяются по синусоидальному закону.
2. Критическая частота равна нулю (конечная критическая длина волны отсутствует). Это означает, что по коаксиальной линии могут распространяться Т-волны любых частот.
3. Фазовая и групповая скорости равны скорости электромагнитной волны в данной среде и не зависят от частоты, то есть отсутствует дисперсия [4].

Однако при определенных условиях в коаксиальной линии могут возникнуть электромагнитные волны высших типов. Такие волны характеризуются:

1. Наличием не только поперечных, но и продольных составляющих поля.
2. Существованием конечной критической длины волны.
3. Дисперсией (частотной зависимостью фазовой и групповой скоростей поля).

Такими дисперсными волнами являются электрические ( $E_{np}$ ) и магнитные ( $H_{np}$ ) волны. Индекс  $n$  означает число максимумов по азимуту, а  $i$  – чис-



**Рис. 1.3.** Электрическое и магнитное поля в поперечном сечении коаксиальной линии и векторное изображение электрической волны типа  $E_{01}$  (а) и магнитной волны типа  $H_{11}$  (б)

ло максимумов по радиусу. Простейшей электрической волной является волна типа  $E_{01}$  (рис. 1.3, а), простейшей магнитной волной — волна типа  $H_{11}$  (рис. 1.3, б).

У электрических волн вектор напряженности магнитного поля имеет только поперечную составляющую, а вектор напряженности электрического поля — как поперечную, так и продольную составляющие (поперечно-магнитные волны) (рис. 1.3, а) [4].

Для магнитных волн вектор напряженности электрического поля имеет только поперечную составляющую, а вектор напряженности магнитного поля — как поперечную, так и продольную составляющие — (рис. 1.3, б) (поперечно-электрические волны).

Кроме чисто магнитных и электрических волн в линии могут распространяться волны смешанного типа (ЕН-волны или гибридные волны).

Возможность существования в данной коаксиальной линии волн дисперсных типов зависит от соотношения между длиной волны в свободном пространстве и критической длиной для рассматриваемого типа волн.

Все эти волны могут распространяться, только начиная с некоторой критической частоты. Область волн с длиной волны меньше критической или область волн с частотой больше критической является областью отсечки, в которой по линии не могут передаваться дисперсные волны. Критические длины высших волн связаны с геометрическими размерами поперечного сечения коаксиальной линии. Наибольшую длину волны в коаксиальной линии имеет волна  $H_{11}$ .

В коаксиальной линии передачи дисперсные волны не имеют практического применения. На низких частотах они распространяться не могут и быстро затухают. Появление же высших типов волн в диапазоне СВЧ нежелательно, так как это нарушает нормальный режим работы коаксиальной линии. В линии возможно появление паразитных резонансов, что вызывает ослабление СВЧ-сигнала. Вследствие этого критическая частота волны является верхней границей рабочего диапазона частот различных коаксиальных

устройств. Предельную рабочую частоту удобно рассчитывать по приближенной формуле [5]:

$$f_{\text{пред}} (\text{ГГц}) \equiv \frac{190,8}{\sqrt{\epsilon(D+d)}}, \quad (1.1)$$

где  $D$  и  $d$  – размеры линии, мм;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Для увеличения предельной рабочей частоты приходится уменьшать размеры поперечного сечения коаксиальной линии и заполнять ее диэлектриком с малой величиной диэлектрической проницаемости. Идеальным вариантом является воздушная коаксиальная линия. В таблице 1.2 приведены предельные частоты коаксиальных воздушных линий по данным международного стандарта IEE STD 287 [11].

**Таблица 1.2. Предельные частоты 50-Омных коаксиальных линий**

Внутренний диаметр наружного проводника линии, мм	7,0	3,5	2,92	2,4	1,85	1,0
Верхняя частота применения, ГГц	18	33	40	50	65	110
Теоретическая предельная частота, ГГц	19,4	38,8	46,5	56,5	73,3	135,7

## ГЛАВА 2

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ

#### 2.1. Экранированность коаксиальной линии

В коаксиальной линии электромагнитное поле заключено в пространстве между наружным и внутренним проводниками. При передаче по такой линии энергии СВЧ по проводникам линии протекают токи, сосредоточенные благодаря поверхностному эффекту в тонком приповерхностном слое металла. Толщину слоя металла, при которой амплитуда электромагнитной волны уменьшается в  $e$  раз (2,71 раза), называют глубиной проникновения волны в металл или глубиной «скин-слоя». Глубину «скин-слоя»- $\delta$  (мм) рассчитывают по формуле [5]:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (2.1)$$

где  $f$  – частота, Гц;  $\mu$  – магнитная проницаемость металла;  $\rho$  – удельное сопротивление металла, Ом·м.

Глубина «скин-слоя» для разных металлов в зависимости от частоты приведена в таблице 2.1.

**Таблица 2.1.** Глубина «скин-слоя» для разных металлов  
в зависимости от частоты

Металл	Глубина «скин-слоя», мкм, на частотах, ГГц			
	0,1	1,0	10	30
Золото	8,5	2,6	0,85	0,48
Серебро	6,4	2,0	0,64	0,36
Медь	6,7	2,1	0,67	0,38
Никель	28,5	9,0	2,85	1,64
Сплав 29НК	196	62	19,6	11,3
Сплав олово-висмут	44	14	4,4	2,6
Сплав палладий-никель	70	22	7,0	4,0

Как видно из таблицы 2.1, глубина «скин-слоя» тем меньше, чем выше частота и чем больше электропроводность и магнитная проницаемость металла. Важно подчеркнуть, что слои металла, по которым протекают токи, всегда являются пограничными между диэлектриком, в котором распространяется электромагнитная волна, и металлом проводников коаксиальной линии. Токи, следовательно, протекают по наружному слою внутреннего проводника и по внутреннему слою внешнего проводника. При этом наружная поверхность внешнего проводника тока вовсе не несет, и поэтому снаружи не требуется никакой изоляции.

Таким образом, благодаря поверхностному эффекту коаксиальная линия является экранированной линией передачи (электромагнитная энергия локализована в пределах определенного пространства). В общем случае степень экранированности характеризуется отношением напряженности электрического или магнитного поля в какой-либо точке экранированного пространства к напряженности поля в той же точке при отсутствии экрана и измеряется в децибелах [5]. Экранное затухание (радиогерметичность) линии характеризуют также плотностью потока мощности СВЧ во внешнем пространстве на заданном расстоянии от наружного проводника [2].

Знание глубины «скин-слоя» необходимо также при выборе состава и толщины покрытия проводников коаксиальной линии. На частотах более 1 ГГц толщина «скин-слоя» для хорошо проводящих металлов составляет всего лишь единицы и доли микрометра. Поэтому достаточно покрыть проводники из плохо проводящих металлов, например часто применяемого сплава 29НК, слоем золота или серебра толщиной несколько микрометров, чтобы обеспечить протекание поверхностного тока по хорошо проводящему слою и снизить прямые потери в линии передачи.

## 2.2. Волновое сопротивление

Рассмотрим простейшую схему передачи электромагнитной волны по коаксиальной линии с неоднородностью (рис. 2.1). Такой неоднородностью можно считать, например, соединитель, при помощи которого линия присоединена к радиочастотному тракту.

Для упрощения рассмотрения сделаем следующие допущения:

1. Пренебрежем активными потерями, что оправдано при умеренной длине линии.
2. Ограничимся линейным режимом, при котором параметры линии не зависят от амплитуды сигнала.
3. Будем считать, что на рабочей частоте распространяется волна только одного типа.



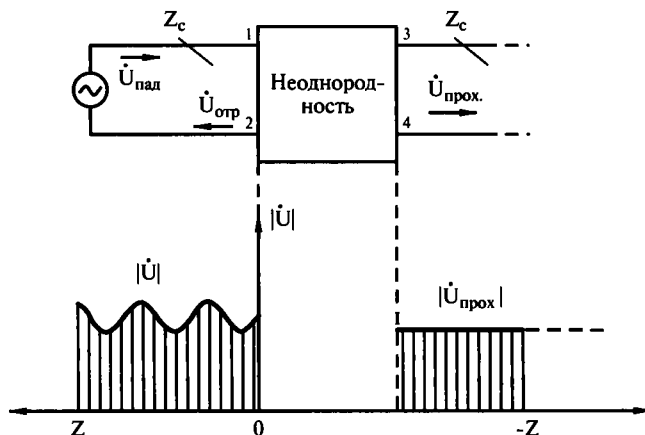


Рис. 2.1. Электрическая схема линии с неоднородностью (а) и распределение напряжения вдоль линии (б)

Тогда на участке линии между генератором и неоднородностью возможно существование одной падающей волны с комплексными величинами напряжения и тока. В любом сечении линии справедливы равенства [4]:

$$\dot{U} = \dot{U}_{пад} + \dot{U}_{отр}, \quad (2.2)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_{пад} + \dot{I}_{отр}. \quad (2.3)$$

Для случая однородной линии без потерь сопротивление линии в любом сечении называют волновым (характеристическим) сопротивлением:

$$\dot{Z}_0 = \frac{\dot{U}_{пад}}{\dot{I}_{пад}}. \quad (2.4)$$

В общем случае волновое сопротивление — величина комплексная. Но для рассматриваемой однородной линии без потерь оно является активным сопротивлением. Волновое сопротивление линии передачи можно определить как активное эквивалентное сопротивление, на котором рассеивалась бы мощность, фактически переносимая через сечение линии падающей электромагнитной волной. Необходимо также подчеркнуть, что в любой линии, какой бы длины она ни была, нагруженной на сопротивление, равное волновому, не будет возникать стоячая волна, и входное сопротивление линии будет также равно волновому сопротивлению [4].

Понятие «волновое сопротивление» достаточно условно. Его нельзя отождествлять с обычным понятием активного сопротивления как потребителя энергии (нагрузка, сопротивление потерь). Действительно, по опреде-

лению, в линии без потерь энергия при переносе по ней электромагнитной волны не потребляется, хотя сама линия имеет активное волновое сопротивление.

Волновое сопротивление определяется геометрическими размерами поперечного сечения линии и диэлектрической проницаемостью изоляции. Для типичного случая линии круглого сечения:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D}{d}, \quad (2.5)$$

где  $Z_0$  – волновое сопротивление, Ом;  $D$  и  $d$  – размеры линии, мм;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость изоляции.

Следует подчеркнуть, что параметры  $\epsilon$ ,  $\mu$  и  $\lg \delta$  имеют выраженную частотную зависимость, поэтому здесь и в дальнейшем при расчетах следует применять значения этих параметров, измеренные на частотах, соответствующих рабочему диапазону частот.

Для воздушной коаксиальной линии ( $\epsilon = 1$ ):

$$Z_0 = 138 \lg \frac{D}{d}. \quad (2.6)$$

При выборе стандартной величины волнового сопротивления исходили из следующих соображений. Максимальная мощность на данной длине волны может передаваться в воздушной коаксиальной линии, если ее волновое сопротивление равно 44,5 Ом. Минимальные потери в такой линии соответствуют сопротивлению 93 Ом. При заданном же диаметре наружного проводника максимальная мощность передается в линии с волновым сопротивлением 30 Ом, а минимальные потери в ней соответствуют волновому сопротивлению 77 Ом [4]. Таким образом, стандартную величину волнового сопротивления выбирали в диапазоне от 30 до 93 Ом. В микроэлектронике СВЧ стандартной величиной волнового сопротивления принято считать 50 Ом. 50-Омная коаксиальная линия является компромиссным стандартом. При этом достигается значительная экономия не только элементов конструкции РЭА СВЧ, но и используемой измерительной аппаратуры. Желательно, чтобы все элементы радиочастотного тракта, включая соединители, имели волновое сопротивление 50 Ом.

## 2.3. Коэффициент отражения

Отражения возникают в линии из-за ее неоднородности или несогласованности с нагрузкой. Коэффициентом отражения принято называть отношение комплексных амплитуд напряжений отраженной и падающей волны в сечении неоднородности или нагрузки (сечение 1–2 на рис. 2.1) [4]:

$$\Gamma = \frac{\dot{U}_{\text{отр}}}{\dot{U}_{\text{пад}}} . \quad (2.7)$$

Величина коэффициента отражения зависит от соотношения волнового сопротивления линии и сопротивления нагрузки:

$$\Gamma = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} . \quad (2.8)$$

Отсутствие отражения ( $\Gamma = 0$ ) достигается согласованием сопротивления нагрузки и волнового сопротивления линии:  $Z_n = Z_0$ . При этом происходит полная передача мощности падающей волны в нагрузку. При полном отражении  $|\Gamma|=1$  модули напряжений падающей и отраженной волн равны и не происходит поглощения мощности в нагрузке. В общем случае диапазон возможных значений коэффициента отражения —  $0 \leq \Gamma \leq 1$

## 2.4. Коэффициент стоячей волны

Вернемся к рисунку 2.1. Так как в линии одновременно существуют падающая и отраженная волны, то, складываясь, они образуют в ней стоячую волну. Характерным признаком стоячей волны является периодическое изменение абсолютных величин напряжения и тока вдоль оси распространения волны (продольной оси линии). В линии со стоячей волной появляются места, где напряжения и токи принимают максимальное и минимальное значения. При этом точки максимального напряжения совпадают с точками минимального тока и наоборот. Коэффициентом стоячей волны  $K_{\text{ст}U}$  называют отношение максимального и минимального напряжений в линии передачи:

$$K_{\text{ст}U} = \frac{\dot{U}_{\text{max}}}{\dot{U}_{\text{min}}} . \quad (2.9)$$

Этот параметр часто обозначают КСВН — коэффициент стоячей волны по напряжению.

В отличие от коэффициента отражения КСВН является величиной скалярной. Его часто используют в технике СВЧ вместо коэффициента отражения, так как КСВН наглядно характеризует стоячую волну в линии передачи и сравнительно просто измеряется. Связь между КСВН и коэффициентом отражения выражается формулой:

$$K_{\text{ст}U} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} . \quad (2.10)$$

При малых величинах коэффициента отражения ( $\Gamma \leq 1$ ):

$$K_{\text{ст}U} \cong 1 + 2\Gamma . \quad (2.11)$$

Коэффициент стоячей волны может принимать значения от 1 (режим бегущей волны, отражение отсутствует) до бесконечности, что соответствует полному отражению от нагрузки ( $\Gamma = 1$ ).

Если коаксиальная линия содержит несколько неоднородностей, то результирующая стоячая волна является суммой частных стоячих волн, и при наихудших фазовых соотношениях результирующий КСВН равен:

$$K_{\text{ст U (рез)}} = K_{\text{ст U (1)}} \cdot K_{\text{ст U (2)}} \cdot K_{\text{ст U (n)}}, \quad (2.12)$$

где  $n$  – число неоднородностей.

Иногда вместо коэффициента стоячей волны используют коэффициент бегущей волны – КБВ, являющийся величиной обратной КСВН [5]:

$$КБВ = \frac{1}{K_{\text{ст U}}}. \quad (2.13)$$

Диапазон изменения КБВ лежит между нулем и единицей. Кроме того, в зарубежной технической литературе наряду с коэффициентами отражения и стоячей волны часто используют величину обратных потерь  $RL$  (Return Loss). Между этими величинами существует следующая связь:

$$RL = 20 \lg \frac{1}{|\Gamma|}, \quad (2.14)$$

$$\Gamma = \frac{K_{\text{ст U}} - 1}{K_{\text{ст U}} + 1}. \quad (2.15)$$

Чем больше величина обратных потерь, тем меньше  $K_{\text{ст U}}$ . Соотношение величин обратных потерь и КСВН приведено в табл. 2.2 по данным фирмы Amphenol Corp. [12]. Наличие в коаксиальной линии неоднородностей ухудшает параметры не только самой линии, но и всего устройства СВЧ. В измерительной технике принципиально важно снижение КСВН, так как это обеспечивает достоверность и точность измерений.

## 2.5. Типовые режимы в коаксиальной линии

Рассмотрим простейшую схему нагруженной линии передачи (неоднородность – в качестве нагрузки) (см. рис. 2.1). Распределение напряжений в линии при различных значениях коэффициентов отражения и стоячей волны показано на рисунке 2.2 [4].

Возможны следующие режимы работы:

1. Сопротивление нагрузки активно и равно волновому сопротивлению линии.

В линии устанавливается только бегущая волна (режим чисто бегущей волны). При этом отсутствует отражение ( $\Gamma = 0$ ,  $K_{\text{ст U}} = 1$ ) (рис. 2.2, а). Такой режим называется режимом согласования, и он оптимален для канализации

Таблица 2.2. Соотношение величин КВЧН и обратных потерь

КВЧН	RL, дБ	КВЧН	RL, дБ	КВЧН	RL, дБ	КВЧН	RL, дБ	КВЧН	RL, дБ
1.001	66.025	1.060	30.714	1.138	23.803	1.480	14.264	5.400	3.255
1.002	60.009	1.061	30.575	1.140	23.686	1.490	14.120	5.600	3.136
1.003	56.491	1.062	30.438	1.142	23.571	1.500	13.979	5.800	3.025
1.004	53.997	1.063	30.303	1.144	23.457	1.520	13.708	6.000	2.923
1.005	50.484	1.064	30.171	1.146	23.346	1.540	13.449	6.200	2.827
1.006	50.484	1.065	30.040	1.148	23.235	1.560	13.201	6.400	2.737
1.007	49.149	1.066	29.912	1.150	23.127	1.580	12.964	6.600	2.653
1.008	47.993	1.067	29.785	1.152	23.020	1.600	12.736	6.800	2.573
1.009	46.975	1.068	29.661	1.154	22.914	1.620	12.518	7.000	2.499
1.010	46.064	1.069	29.538	1.156	22.810	1.640	12.308	7.200	2.428
1.011	45.240	1.070	29.417	1.158	22.708	1.660	12.107	7.400	2.362
1.012	44.489	1.071	29.298	1.160	22.607	1.680	11.913	7.600	2.299
1.013	43.798	1.072	29.181	1.162	22.507	1.700	11.725	7.800	2.239
1.014	43.159	1.073	29.066	1.164	22.408	1.720	11.545	8.000	2.183
1.015	42.564	1.074	28.952	1.166	22.311	1.740	11.370	8.200	2.129
1.016	42.007	1.075	28.839	1.168	22.215	1.760	11.202	8.400	2.078
1.017	41.485	1.076	28.728	1.170	22.120	1.780	11.039	8.600	2.029
1.018	40.993	1.077	28.619	1.172	22.027	1.800	10.881	8.800	1.983
1.019	40.528	1.078	28.511	1.174	21.934	1.820	10.729	9.000	1.938
1.020	40.086	1.079	28.405	1.176	21.843	1.840	10.581	9.200	1.896
1.021	39.667	1.080	28.299	1.178	21.753	1.860	10.437	9.400	1.855
1.022	39.267	1.081	28.196	1.180	21.664	1.880	10.298	9.600	1.816
1.023	38.885	1.082	28.093	1.182	21.576	1.900	10.163	9.800	1.779
1.024	38.520	1.083	27.992	1.184	21.489	1.920	10.032	10.000	1.743
1.025	38.170	1.084	27.892	1.186	21.403	1.940	9.904	11.000	1.584
1.026	37.833	1.085	27.794	1.188	21.318	1.960	9.780	12.000	1.451
1.027	37.510	1.086	27.696	1.190	21.234	1.980	9.660	13.000	1.339
1.028	37.198	1.087	27.600	1.192	21.151	2.000	9.542	14.000	1.243
1.029	36.895	1.088	27.505	1.194	21.069	2.100	8.999	15.000	1.160
1.030	36.607	1.089	27.411	1.196	20.988	2.200	8.519	16.000	1.087
1.031	36.327	1.090	27.318	1.198	20.907	2.300	8.091	17.000	1.023
1.032	36.055	1.091	27.266	1.200	20.828	2.400	7.707	18.000	0.966
1.033	35.792	1.092	27.135	1.210	20.443	2.500	7.360	19.000	0.915
1.034	35.537	1.093	27.046	1.220	20.079	2.600	7.044	20.000	0.869
1.035	35.290	1.094	26.957	1.230	19.732	2.700	6.755	22.000	0.790
1.036	35.049	1.095	26.869	1.240	19.401	2.800	6.490	24.000	0.724
1.037	34.816	1.096	26.782	1.250	19.085	2.900	6.246	26.000	0.668
1.038	34.588	1.097	26.697	1.260	18.783	3.000	6.021	28.000	0.621
1.039	34.367	1.098	26.612	1.270	18.493	3.100	5.811	30.000	0.579
1.040	34.151	1.099	26.528	1.280	18.216	3.200	5.617	32.000	0.543
1.041	33.941	1.100	26.444	1.290	17.949	3.300	5.435	34.000	0.511
1.042	33.763	1.102	26.281	1.300	17.692	3.400	5.265	36.000	0.483
1.043	33.536	1.104	26.120	1.310	17.445	3.500	5.105	38.000	0.457
1.044	33.341	1.106	25.963	1.320	17.207	3.600	4.956	40.000	0.434
1.045	33.150	1.108	25.809	1.330	16.977	3.700	4.815	42.000	0.414
1.046	32.963	1.110	25.658	1.340	16.755	3.800	4.682	44.000	0.395
1.047	32.780	1.112	25.510	1.350	16.540	3.900	4.556	46.000	0.378
1.048	32.602	1.114	25.364	1.360	16.322	4.000	4.437	48.000	0.362
1.049	32.427	1.116	25.221	1.370	16.131	4.100	4.324	50.000	0.347
1.050	32.256	1.118	25.081	1.380	15.936	4.200	4.217	55.000	0.316
1.051	32.088	1.120	24.943	1.390	15.747	4.300	4.115	60.000	0.290
1.052	31.923	1.122	24.808	1.400	15.563	4.400	4.018	65.000	0.267
1.053	31.762	1.124	24.675	1.410	15.385	4.500	3.926	70.000	0.248
1.054	31.604	1.126	24.544	1.420	15.211	4.600	3.838	75.000	0.232
1.055	31.449	1.128	24.415	1.430	15.043	4.700	3.753	80.000	0.217
1.056	31.297	1.130	24.289	1.440	14.879	4.800	3.673	85.000	0.204
1.057	31.147	1.132	24.164	1.450	14.719	4.900	3.596	90.000	0.193
1.058	31.000	1.134	24.042	1.460	14.564	5.000	3.522	95.000	0.183
1.059	30.856	1.136	23.921	1.470	14.412	5.200	3.383	100.000	0.174

электромагнитной энергии, так как дает минимум потерь и наименьшее искажение сигналов. Практически он нереализуем.

2. а) Линия разомкнута на конце — «холостой ход» ( $\Gamma = -1$ ,  $K_{\text{сгу}} = \infty$ ), сопротивление нагрузки бесконечно велико (рис. 2.2, б).

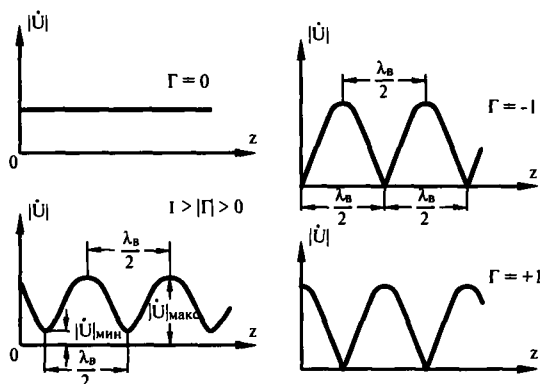


Рис. 2.2. Распределение напряжений в нагруженной коаксиальной линии при различных величинах коэффициента отражения.  $\Gamma = 0$  (а),  $\Gamma = -1$  (б),  $\Gamma = +1$  (в),  $0 < \Gamma < 1$  (г)

б) Линия закорочена – «короткое замыкание» ( $\Gamma = +1$ ,  $K_{\text{сгУ}} = \infty$ ), сопротивление нагрузки равно нулю (рис. 2.2, в).

В обоих случаях, а также в случае чисто реактивной (емкостной или индуктивной) нагрузки происходит полное отражение энергии от конца линии, коэффициент отражения равен единице, а КСВН – бесконечности. При этом энергия в нагрузке не потребляется, и входное сопротивление линии имеет чисто реактивный характер.

3. Линия нагружена на активное сопротивление, не равное по величине волновому сопротивлению линии (рис. 2.2, г). В этом случае имеет место частичное отражение. Коэффициент отражения  $0 < \Gamma < 1$ , и КСВН становится больше единицы:  $1 < K_{\text{сгУ}} < \infty$  (режим стоячей волны).

## 2.6. Емкость, индуктивность, сопротивление и проводимость линии

Эквивалентную схему коаксиальной линии можно представить как последовательное соединение ячеек, составленных из сосредоточенных емкости, индуктивности, активного сопротивления и проводимости изоляции (рис. 2.3) [9].

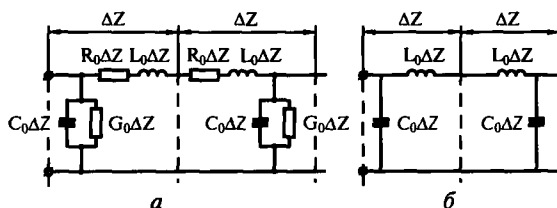


Рис. 2.3. Эквивалентные электрические схемы коаксиальной линии с потерями (а) и без потерь (б)



На сверхвысоких частотах, когда размеры линии соизмеримы с длиной волны, все эти параметры являются распределенными, а не сосредоточенными. Поэтому будем считать, что протяженность таких ячеек —  $\Delta z$  очень мала, много меньше длины волны в линии. Разомкнутая на концах коаксиальная линия представляет собой цилиндрический конденсатор. Его электрическую емкость можно рассчитать по формуле [5]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{D}{d}}, \quad (2.16)$$

где  $C$  — электрическая емкость, Ф;  $l$  — длина конденсатора, м;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума, равная  $8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Обычно для характеристики линии используют понятие погонной электрической емкости, то есть емкости, приходящейся на единицу длины. Погонную емкость  $C_0$  (пФ/м) удобно рассчитывать по формуле [5,9]:

$$C_0 = 24,2 \cdot \frac{\epsilon}{\lg \frac{D}{d}}. \quad (2.17)$$

Для воздушной коаксиальной линии:

$$C_0 = \frac{24,2}{\lg \frac{D}{d}}. \quad (2.18)$$

Другим важным параметром является погонная индуктивность. Она представляет собой сумму индуктивностей наружного и внутреннего проводников линии и взаимной индуктивности проводников в пересчете на единицу длины. Погонная индуктивность коаксиальной линии приблизительно равна [5]:

$$L_0 \cong 4,6 \cdot 10^{-7} \mu \lg D/d, \quad (2.19)$$

где  $L_0$  — погонная индуктивность, Гн/м;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость;  $D$  и  $d$  — диаметры линии, мм.

Активное сопротивление коаксиальной линии складывается из сопротивлений внутреннего и наружного проводников. Активное погонное сопротивление линии —  $R_0$ , Ом /м, равно [5]:

$$R_0 = \sqrt{f \cdot 10^{-7}} \left( \frac{\sqrt{\mu_1 \rho_1}}{d} + \frac{\sqrt{\mu_2 \rho_2}}{D} \right), \quad (2.20)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — относительные магнитные проницаемости металлов внутреннего и наружного проводников;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — удельное электрическое сопротивление металлов этих проводников, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $f$  — частота, Гц.

Наконец, четвертый параметр — погонная проводимость изоляции — рассчитывается по формуле:

$$G_0 = \frac{2\pi}{\rho_D \ln \frac{D}{d}} + \omega \cdot \text{ctg} \delta, \quad (2.21)$$

где  $G_0$  — погонная проводимость, См/м;  $\omega$  — частота;  $C_0$  — погонная емкость, Ф/м;  $\rho_D$  — удельное сопротивление диэлектрика.

Первый член этой формулы представляет собой проводимость изоляции на постоянном токе. Второй член формулы учитывает ее проводимость на высоких частотах. На практике первый член существенно меньше второго, и им можно пренебречь. Тогда:

$$G_0 \cong \omega C_0 \text{tg} \delta. \quad (2.22)$$

Знание величин  $C_0$ ,  $L_0$ ,  $R_0$  и  $G_0$  позволяет рассчитать все основные параметры коаксиальной линии: волновое сопротивление, потери энергии, фазовую скорость волны и др. Так, например, волновое сопротивление линии равно:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}. \quad (2.23)$$

Для линии без потерь ( $R_0 = 0$ ,  $G_0 = 0$ ):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (2.24)$$

После преобразований, полагая  $\mu = 1$ , получим уже известную формулу волнового сопротивления (2.5):

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D}{d}.$$

Из рассмотрения эквивалентной схемы коаксиальной линии, а также зависимости ее волнового сопротивления от индуктивности и емкости можно сделать два полезных вывода:

1. Короткий отрезок линии замедления с высоким волновым сопротивлением можно представить в виде последовательной индуктивности, так как шунтирующая емкость мала и ею можно пренебречь.
2. Короткий отрезок линии с малым волновым сопротивлением является по существу емкостью, так как индуктивность мала и ею можно пренебречь.

## 2.7. Активные потери

Напряжение и мощность в линии передачи в общем случае изменяются по экспоненциальному закону [4]:

$$U = U_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (2.25)$$

$$P = P_0 \cdot e^{-2\alpha l}, \quad (2.26)$$

где  $U_0$  — напряжение в начале линии;  $P_0$  — мощность в начале линии;  $l$  — длина линии,  $\alpha$  — коэффициент затухания (поглощения).

Для реальных линий активное сопротивление  $R_0$  и проводимость  $G_0$  много меньше соответствующих реактивных составляющих  $L_0$  и  $C_0$ , т.е.  $R_0/\omega L_0 \ll 1$  и  $G_0 \ll \omega C_0$ . При этом условии коэффициент затухания рассчитывают по формуле [5, 9]:

$$\alpha = \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (2.27)$$

или после преобразований

$$\alpha = \frac{1.98 \cdot 10^{-5} \sqrt{\epsilon} f}{\lg \frac{D}{d}} \left( \frac{\sqrt{\mu_1 \rho_1}}{d} + \frac{\sqrt{\mu_2 \rho_2}}{D} \right) + 9.08 \cdot 10^{-8} f \sqrt{\epsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.28)$$

где  $\alpha$  — коэффициент затухания на единицу длины линии, дБ/м;  $d$  и  $D$  — размеры коаксиальной линии, мм;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — удельное электрическое сопротивление металлов соответственно внутреннего и наружного проводников линии, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — относительные магнитные проницаемости металлов этих проводников;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции;  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

Чтобы уменьшить потери в коаксиальной линии, необходимо использовать для изготовления проводников металлы или покрытия с высокой проводимостью, а в качестве изоляции — материалы с низкими величинами  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ . Более подробно вопрос о потерях рассмотрен в главе 3.

\*\*\*

*Затухание принято измерять в децибелах или в неперах. Соотношение между этими единицами следующее: 1 непер = 8,68 децибела.*

*В технике СВЧ затухание, а также многие другие величины (отношение напряжений, мощностей, коэффициенты усиления, шума и др.) характеризуют в децибелах. Учитывая распространенность этой единицы, приведем несколько полезных соотношений: 3 дБ соответствуют изменению величины в 2 раза,*

*6 дБ – 4 раза, 10 дБ – 10 раз, 20 дБ – 100 раз, 30 дБ – 1000 раз и т.д. Пользуясь этими цифрами, можно, например, легко найти, что затухание 23 дБ соответствует ослаблению сигнала в  $100 \times 2 = 200$  раз. Затуханию  $37 \text{ дБ} = (40 - 3) \text{ дБ}$  соответствует ослабление сигнала, равное  $10\,000 : 2 = 5000$  раз.*

## МИНИАТЮРНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ СВЧ-ВВОДЫ

### 3.1. Конструкция

Коаксиальные вводы сверхвысокой частоты (СВЧ-вводы) выполняют функцию вывода сигналов с МПЛ без отражений и потерь в изделиях микроэлектроники. Такие вводы могут применяться как самостоятельные элементы, но чаще их используют в сочетании с СВЧ-разъемами в составных соединителях (field replaceable connectors). Классический пример таких соединителей — соединители типа К [13]. Кроме того, СВЧ-вводы используют для подвода напряжения питания, а также управляющих и модулирующих сигналов в изделиях с унифицированными корпусами. Волновое сопротивление СВЧ-вводов для микроэлектроники, за исключением специальных применений, равно 50 Ом. К специальным применениям можно отнести установку СВЧ-ввода перпендикулярно МПЛ, в этом случае волновое сопротивление может быть близко к 30 Ом.

Конструкция СВЧ-вводов включает наружный цилиндрический и внутренний проводники, а также герметично спаянный с ними диэлектрик (рис. 3.1).

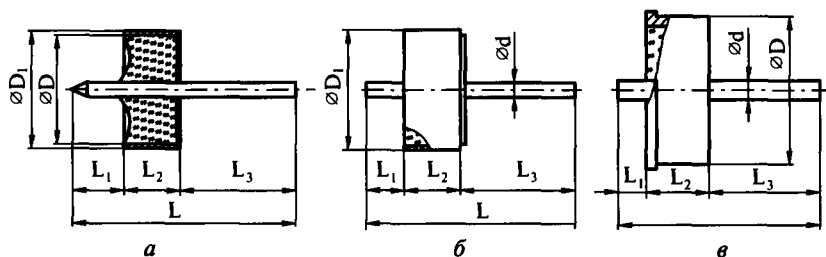


Рис. 3.1. СВЧ- вводы: типовые (а), самоустанавливающиеся (б), с буртиком (в)

В качестве диэлектрика в основном используют электровакуумное стекло с низкой диэлектрической проницаемостью, обеспечивающее миниатюризацию, упрощение технологии изготовления и снижение стоимости вводов [14]. Изредка для этой цели применяют специальные ситаллы и керамику. Диэлектрические свойства (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) используемых в СВЧ-вводах стекол отечественного и зарубежного производства, а также, для сравнения, алюмооксидной кера-

мики приведены в таблице 3.1 [15, 16]. Эти данные необходимы для расчета основных параметров вводов.

**Таблица 3.1.** Диэлектрические свойства стекол и керамики

Марка стекла	$\epsilon$ , $\text{tg } \delta$	Величины $\epsilon$ и $\text{tg } \delta$ на частотах, ГГц			
		0,001	3	10	38
C52-1	$\epsilon$	5,7	5,5	5,2	5,0
	$\text{tg } \delta \times 10^4$	30	-	95	140
C37-2	$\epsilon$	4,2	-	4,0	-
	$\text{tg } \delta \times 10^4$	4,0	-	15	-
Corning 7052	$\epsilon$	5,1	5,04	4,93	-
	$\text{tg } \delta \times 10^4$	26	58	81	-
Corning 7070	$\epsilon$	4,0	-	4,0	-
	$\text{tg } \delta \times 10^4$	8	12	21	-
Алюмооксидная керамика	$\epsilon$	10,3	-	9,8	-
	$\text{tg } \delta \times 10^4$	2	-	2	-

Металлические проводники вводов изготавливают из сплава 29НК (ковар), согласованного по коэффициенту термического расширения (КТР) со стеклами марок C52-1 и Corning 7052, что обеспечивает получение надежных герметичных спаев, выдерживающих испытания на термоциклирование. Для получения согласованных по КТР спаев со стеклами C37-2 и Corning 7070 подходит только вольфрам. Но обычно эти стекла используют для получения несогласованных сжатых спаев со сплавом ковар.

После пайки со стеклом металлические детали вводов покрывают золотом толщиной 1–3 мкм по подслою никеля. Золотое покрытие обеспечивает надежный контакт внутреннего проводника ввода с МПЛ и гнездом СВЧ-разъема, а наружного проводника – с корпусом изделия. Вместо золота используют покрытия никелем и его сплавами или сплавом олово-висмут. При создании изделий микроэлектроники повышенной надежности и долговечности использовать сплав олово-висмут нежелательно.

### 3.2. Расчет параметров

Основными параметрами СВЧ-вводов являются величины волнового сопротивления, КСВН и высокочастотных потерь в требуемом диапазоне частот. Формулы для расчета этих параметров сведены в таблице 3.2 [17].

В формулах  $D$  и  $d$  – диаметры наружного и внутреннего проводников, мм (рис.3.1, а);  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика;  $e$  – эксцентриситет, мм;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала проводников (на сверхвысоких частотах  $\mu = 1$ );  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводников, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $\alpha$  – высокочастотные потери на единицу длины, дБ;  $f$  – частота, Гц.

Таблица 3.2. Основные уравнения для расчета СВЧ-вводов

№ п/п	Параметры	Формулы
1	Волновое сопротивление $Z_0$ , Ом	$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D}{d} \quad (3.1)$
2	Погрешность волнового сопротивления $\Delta Z_0$ (Ом) в зависимости от:	
	допуска на диаметр $D$ , $\Delta D$ , мм	$\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{\Delta D}{D} \quad (3.2)$
	допуска на диаметр $d$ , $\Delta d$ , мм	$\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{\Delta d}{d} \quad (3.3)$
	допусков $\Delta D$ и $\Delta d$ , мм	$\Delta Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2} \quad (3.4)$
	эксцентриситета $e$ , мм	$\Delta Z_0 = -240 \cdot \left( \frac{\epsilon^2}{D^2 + d^2} \right) \quad (3.5)$
	отклонения диэлектрической проницаемости, $\Delta \epsilon / \epsilon$	$\frac{\Delta Z_0}{Z_0} = \left( -\frac{1}{2} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \right) \quad (3.6)$
3	КСВН	$K_{свн} = 1 + \frac{ \Delta Z_0 }{Z_0} \quad (3.7)$
4	Высокочастотные потери $\alpha$ , дБ/м:	
	в проводниках, $\alpha_{ме}$	$\alpha_{ме} = \frac{1,98 \cdot 10^{-3} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)}{\lg \frac{D}{d}} \sqrt{\epsilon \mu f \rho} \quad (3.8)$
	в диэлектрике, $\alpha_{дизл}$	$\alpha_{дизл} = 9,08 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \sqrt{\epsilon} \quad (3.9)$
	общие, $\alpha_{общ}$	$\alpha_{общ} = \alpha_{ме} + \alpha_{дизл} \quad (3.10)$

### 3.3. Волновое сопротивление и КСВН

Требуемую величину волнового сопротивления можно обеспечить, подобрав отношение диаметров наружного и внутреннего проводников  $D/d$  и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  (формула 3.1 в табл. 3.2). Если диэлектрик уже выбран, отношение  $D/d$  является величиной постоянной. Так, при использо-

вании в СВЧ-вводах с волновым сопротивлением 50 Ом в качестве диэлектрика стекла С52-1 отношение  $D/d$  равно 6,7. Замена стекла алюмооксидной керамикой приводит к увеличению этого отношения до 13,6, и размеры ввода возрастают приблизительно в 2 раза. К тому же технология изготовления металлокерамических вводов значительно сложнее и дороже, чем металлотеклянных. Поэтому керамику в СВЧ-вводах применяют только в исключительных случаях (при высоких уровнях пропускаемой мощности и тепловых нагрузок).

Погрешности волнового сопротивления и КСВН зависят от ряда факторов: допусков на диаметры проводников, эксцентриситета их взаимного расположения, величины зазоров между проводниками и диэлектриком, шероховатости поверхностей проводников, отклонения величины диэлектрической проницаемости, формы свободных поверхностей диэлектрика.

Результаты расчета погрешности волнового сопротивления и КСВН в зависимости от допусков на диаметры проводников приведены в таблице 3.3.

**Таблица 3.3.** Зависимость погрешности волнового сопротивления и КСВН от допусков на диаметры внутреннего  $\Delta d$  и наружного  $\Delta D$  проводников

Диаметры $D$ и $d$ , мм	Погрешность волнового сопротивления $ \Delta Z_0 $ , Ом и КСВН при допусках $\Delta d$ и $\Delta D$ , мм							
	0,01		0,025		0,05		0,1	
	$ \Delta Z_0 $	$K_{\text{свн}}$	$ \Delta Z_0 $	$K_{\text{свн}}$	$ \Delta Z_0 $	$K_{\text{свн}}$	$ \Delta Z_0 $	$K_{\text{свн}}$
$d = 0,3$	0,88	1,018	2,2	1,040	4,4	1,09	8,8	1,18
$d = 0,4$	0,66	1,013	1,65	1,033	3,3	1,07	6,6	1,13
$d = 0,5$	0,53	1,010	1,32	1,026	2,65	1,05	5,3	1,10
$D = 2,0$	0,13	1,003	0,32	1,006	0,65	1,013	1,3	1,03
$D = 2,7$	0,10	1,002	0,25	1,005	0,50	1,010	1,0	1,02
$D = 3,45$	0,08	1,0016	0,20	1,004	0,40	1,008	0,8	1,016

Чем меньше геометрические размеры СВЧ-ввода, а следовательно, чем выше предельная частота, тем жестче требования к точности его изготовления (табл. 3.3). При этом особое внимание следует уделять точности изготовления внутреннего проводника ввода. Требования к точности зависят еще и от назначения вводов. Например, в случае применения их в прецизионных измерительных трактах погрешность волнового сопротивления не должна превышать 0,2%, что соответствует величине КСВН 1,002 [17]. При этом допуск на диаметр внутреннего проводника должен быть несколько микрометров, а на диаметр наружного проводника — 10 мкм. Допуски для СВЧ-вводов, предназначенных для промышленных изделий микроэлектроники, обычно составляют 25—50 мкм.

Эксцентриситет влияет на волновое сопротивление и КСВН слабее, чем неточности диаметров проводников (табл. 3.4), и при использовании СВЧ-ввода в качестве самостоятельного элемента им можно пренебречь.



Однако в составном соединителе из-за неточности совмещения с СВЧ-разъемом эксцентриситет ввода может привести к появлению отражений.

**Таблица 3.4.** Зависимость погрешности волнового сопротивления и КСВН СВЧ-вводов от эксцентриситета, мм

$d$ , мм	$D$ , мм	Погрешность волнового сопротивления, Ом, и КСВН при различном эксцентриситете					
		0,05		0,1		0,2	
		$ \Delta Z_0 $	$K_{ср.у}$	$ \Delta Z_0 $	$K_{ср.у}$	$ \Delta Z_0 $	$K_{ср.у}$
0,3	2,0	0,150	1,003	0,60	1,012	2,40	1,05
0,4	2,7	0,085	1,002	0,34	1,007	1,35	1,03
0,5	3,45	0,052	1,001	0,21	1,004	0,84	1,016

На волновое сопротивление и КСВН-вводов влияет и шероховатость поверхности проводников (из-за удлинения пути токов). Но это влияние становится ощутимым, когда величины шероховатости и допусков на диаметры проводников - одного порядка.

В значительной степени КСВН зависит от зазоров между диэлектриком и проводниками. С этим следует особо считаться, если в качестве диэлектрика используются органические материалы, например фторопласт. В случае его применения необходимо обеспечить плотную посадку диэлектрика между проводниками. Для вводов металlostеклянной конструкции указанный эффект не имеет места.

Влияние отклонения диэлектрической проницаемости на параметры согласования СВЧ-вводов иллюстрируют результаты расчета, приведенные в табл. 3.5.

**Таблица 3.5.** Зависимость волнового сопротивления и КСВН СВЧ-вводов от погрешности относительной диэлектрической проницаемости

$\Delta \epsilon/\epsilon$ , %	5	10	15	20
$\Delta Z_0/Z_0$ , %	2,5	5,0	7,5	10
$K_{ср.у}$	1,025	1,05	1,075	1,1

Причины изменения диэлектрической проницаемости — ее частотная зависимость (см. табл. 3.1), колебание химического состава стекла разных партий, наличие в стекле неоднородностей и газовых пузырьков. Такие пузырьки в монолитном стекле возникают в процессе его пайки с металлом при наличии загрязнения, а также при перегреве. При оптимальной технологии изготовления вводов пузырения стекла не происходит. Нередко в качестве диэлектрика СВЧ-вводов применяют порошковое стекло, особенностью которого — закрытая пористость. Диэлектрическая проницаемость порошкового стекла меньше, чем у монолитного стекла аналогичного состава, и существенно зависит от величины пористости. По нашему мнению, для изготовле-

ния СВЧ-вводов, особенно работающих на частотах выше 10 ГГц, желательно применять только монолитное стекло. Дополнительное преимущество оптически прозрачного монолитного стекла — возможность контроля в нем внутренних дефектов и напряжений, что важно для изделий повышенной надежности.

На параметры согласования СВЧ-ввода при встраивании его в радиочастотный тракт влияет также величина и форма мениска стекла на торцевых поверхностях. В отличие от низкочастотных вводов торцевая поверхность стекла СВЧ-вводов не должна иметь форму выпуклого мениска. Она должна быть либо плоской, либо специальным образом утопленной, как показано на рисунке 3.1, а, т.е. стекло не должно выступать за пределы наружного проводника.

### 3.4. Высокочастотные потери

Высокочастотные потери в СВЧ-вводе условно разделяют на потери в проводниках и потери в диэлектрике (формулы 3.8–3.10 в табл. 3.2). Потери в проводниках пропорциональны  $\sqrt{f}$  и определяются размерами проводников и свойствами материалов, из которых они изготовлены. При этом около 80% всех потерь в проводниках — это потери на внутреннем проводнике ввода. Потери в диэлектрике зависят от частоты, определяются его диэлектрическими свойствами и не зависят от диаметров проводников. Результаты расчета высокочастотных потерь в СВЧ-вводах приведены в табл. 3.6.

**Таблица 3.6.** Высокочастотные потери в СВЧ-вводах со стеклом С52-1 в качестве диэлектрика

Диаметр d, мм	Металл провод- ников	Потери в проводниках — $\alpha_{\text{Mc}}$ диэлектрике — $\alpha_{\text{дизл}}$ и общие потери — $\alpha_{\text{общ}}$ , дБ/мм×10 <sup>3</sup> , на частотах								
		1 МГц			10 ГГц			38 ГГц		
		$\alpha_{\text{Mc}}$	$\alpha_{\text{дизл}}$	$\alpha_{\text{общ}}$	$\alpha_{\text{Mc}}$	$\alpha_{\text{дизл}}$	$\alpha_{\text{общ}}$	$\alpha_{\text{Mc}}$	$\alpha_{\text{дизл}}$	$\alpha_{\text{общ}}$
0,3	Сплав 29НК	0,16	0,0006	0,16	14,8	19,7	34,5	28	108,2	136,2
0,4		0,12	0,0006	0,12	11,0	19,7	30,7	21	108,2	129,2
0,5		0,09	0,0006	0,09	8,8	19,7	28,5	17	108,2	125,2
0,3	медь	0,03	0,0006	0,03	2,7	19,7	22,4	5,2	108,2	113,4

На низких частотах потери в СВЧ-вводах практически определяются потерями в проводниках. Однако, с частоты, равной нескольким ГГц, основной вклад в величину потерь вносят потери в диэлектрике. Потери резко возрастают с ростом частоты, особенно на частотах выше 10 ГГц. С уменьшением размеров вводов уровень потерь возрастает. В реальных СВЧ-вводах высокочастотные потери на частоте 10 ГГц не превышают 0,1 дБ, на частоте 38 ГГц — 0,25 дБ.

Для некоторых применений (сверхмалошумящие устройства, измерительные устройства высокой чувствительности) необходим более низкий уровень потерь в СВЧ-вводе. Для этого в качестве диэлектрика следует применять стекла с лучшими диэлектрическими свойствами, например, стекла Corning 7070 и C37-2. Их диэлектрическая проницаемость на 20–30%, а тангенс угла диэлектрических потерь в 4–6 раз меньше, чем у традиционно используемых стекол Corning 7052 и C52-1. Благодаря меньшей величине диэлектрической проницаемости можно при неизменном диаметре наружного проводника увеличить в 1,1–1,2 раза диаметр внутреннего проводника, сохранив требуемую величину волнового сопротивления. Применение стекол с лучшими диэлектрическими свойствами позволяет снизить уровень потерь на СВЧ в несколько раз. Потери можно снизить до 1,5 раза, уменьшая длину наружного проводника (размер 12 на рис. 3.1).

Если на проводники (прежде всего на внутренний) нанести покрытие с высокой электропроводностью, например медное, потери в проводниках можно снизить на 20–50%. При этом необходимо учесть, что медь из покрытия, нанесенного на металлическое покрытие, в процессе высокотемпературной пайки со стеклом диффундирует в металл. Чтобы после пайки на проводниках еще осталось покрытие, его исходная толщина должна быть более 12 мкм.

### 3.5. Зарубежные и отечественные СВЧ-вводы

СВЧ-вводы выпускают многие зарубежные фирмы: M/A-COM, Southwest Microwave, Northeast Electronics, Dynawave Inc, Thunderline-Z, Advanced Tecnology Group Inc, Balo Hermetics, Xeram Packaging Co, United Glass to Metall Sealing Inc., Molex, Radiall и др. (табл. 3.7) [18–22]. Самые миниатюрные вводы с внутренним проводником диаметром 0,3 мм применяют для работы на частотах до 85 ГГц в составе соединителей типов K, OS-2,4, APC-2,4, APC-1,85. Вводы с внутренним проводником диаметрами 0,4–0,5 мм используют в составе соединителей с предельными частотами 18–26 ГГц (типов SMA, OSP и др.) и как самостоятельные элементы.

Все вводы рассчитаны на волновое сопротивление 50 Ом. Их КСВН оценивается величиной:

$$K_{\text{свн}} = 1,02 + 0,003 f_{(\text{ГГц})}. \quad (3.11)$$

На частоте 10 ГГц КСВН не превышает 1,05, на 18 ГГц – 1,075. Величины высокочастотных потерь и КСВН-вводов на частотах более 18 ГГц в реклам-



Таблица 3.7. Окончание

№ п/п	Тип ввода	Фирма- изготовитель	Рис.3.1	Номинальные размеры, мм					
				<i>d</i>	<i>D</i> <sub>1</sub>	<i>l</i> <sub>1</sub>	<i>l</i> <sub>2</sub>	<i>l</i> <sub>3</sub>	<i>L</i>
23	R 280751000	Radiall Comp [22]	а	0,30	2,51	1,60	—	4,57	8,0
24	R 280755000			0,46	2,85				
25	R 280757060			0,50	4,01	1,75	-	1,78	5,60
26	R 280757080							5,80	9,52
Отечественные									
1	ТС3 575.343	ФГУП "НПП "ИСТОК" [23,24]	а	0,3	2,4	4,0	1,0	1,0	6,0
2	ТС3 575.343-01					2,0	2,0	2,0	
3	КРПГ433434.015-02			0,4	3,4	1,8	2,0	2,7	6,5
4	КРПГ433434.015-03			0,5	3,8				
5	КРПГ433434.003		в	0,6	4,7	2,0	0,95	4,55	7,5
6	КРПГ433434.003-02						6,5	3,5	12,0
7	ТС3 575 425					6,0	2,7	1,8	10,5
8	ТС3.575 425-01					3,5	1,6	2,4	7,5
9	Э282-01		а	1,05	9,0	3,0	4,6	4,4	12,0

Отечественные вводы по своим параметрам практически не отличаются от зарубежных аналогов (табл. 3.7) [23, 24]. Их внешний вид показан на рисунке 3.2.

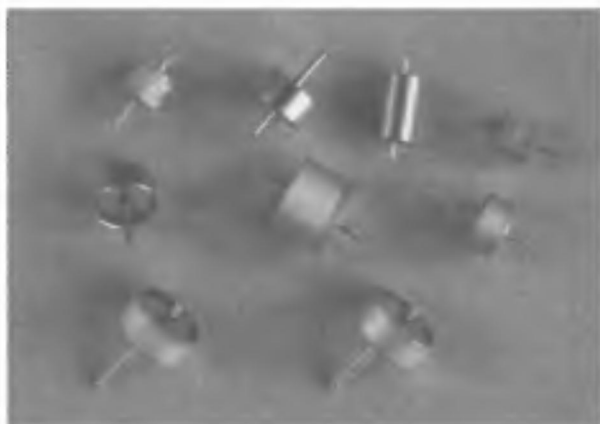


Рис. 3.2. Внешний вид СВЧ-вводов ФГУП «НПП «Исток»

### РАДИОЧАСТОТНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ: НАЗНАЧЕНИЕ, ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ

#### 4.1. Назначение коаксиальных соединителей

Любое устройство, предназначенное для вывода напряжений и сигналов, называют соединителем. Коаксиальный радиочастотный соединитель представляет собой электромеханическое устройство, обеспечивающее механическое и электрическое соединение радиочастотных кабелей между собой или с микрополосковой линией, а также соединение частей устройства [25].

По своему назначению соединители (connectors) делятся на 4 большие группы: кабельные и приборно-кабельные соединители (cable connectors), а также кабельные сборки (cable assembly), вводы СВЧ-энергии (receptacles, launchers), включая соединители для печатных плат (printed circuit board connectors), коаксиально-микрополосковые переходы – КМПП (microstrip line launchers) и адаптеры (adaptors)\*.

В зависимости от требований к электрическим параметрам, их стабильности и воспроизводимости, а также к надежности соединители делятся на измерительные, метрологические и общего применения. Соединители первых двух типов отличаются лучшими параметрами и высокой надежностью. Требование герметичности к ним не предъявляют. Более жесткие требования предъявляются к измерительным соединителям. Соединители общего применения для современных герметизированных устройств СВЧ должны быть герметичными со скоростью натекания не более  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с.

Кабельные соединители предназначены для соединения кабеля с КМПП или с другим кабелем. Обе части соединителей (вилка и розетка) не имеют элементов крепления к корпусу устройства СВЧ. Если же одна из частей пары кабельных соединителей (блочная часть) предназначена для такого крепления, их называют приборно-кабельными соединителями. Кабельные соединители подразделяются на соединители, работающие с гибким радиочастотным кабелем (flexible cable connectors) и с полужестким кабелем

---

\* Для облегчения работы с зарубежной технической литературой здесь и далее приведены соответствующие английские термины

(semi-rigid cable connectors) [26]. Все фирмы – производители соединителей выпускают и широкую номенклатуру кабельных сборок. Кабельная сборка представляет собой отрезок радиочастотного кабеля, концы которого армированы кабельными соединителями. Такие сборки применяют в радиоэлектронной, радиоизмерительной и испытательной аппаратуре.

Большинство функциональных узлов и СВЧ интегральных схем на МПЛ имеют выход на коаксиальные СВЧ-разъемы. Устройство, обеспечивающее вывод сигнала с МПЛ на СВЧ-разъем и далее на радиочастотный кабель, называют коаксиально-микрополосковым переходом.

В связи с развитием техники мобильной связи, компьютеров и периферийных устройств широко применяются миниатюрные, микроминиатюрные и ультраминиатюрные соединители для печатных плат и поверхностного монтажа. Они незаменимы для аппаратуры с высокой плотностью монтажа, в которой требуется быстрое соединение и рассоединение.

Адаптеры (переходы, переходники) обеспечивают сочетание соединителей – розетка, вилка и унipoлярных одного или разных сечений коаксиального канала. Кроме того, адаптеры необходимы для сочетания соединителей, отличающихся видом резьбы на корпусе и способом соединения с ответной частью. Адаптеры обеспечивают увеличение ресурса соединений измерительных приборов, повышают стабильность и воспроизводимость результатов измерений.

Ведущие зарубежные фирмы выпускают соединители военного применения и их коммерческие аналоги. Соединители военного применения должны соответствовать требованиям стандарта MIL-C-39012. Этот стандарт определяет конструкцию, присоединительные размеры и условия применения радиочастотных соединителей большинства известных типов. MIL-C-39012 включает 6 категорий соединителей (A-F Category) в зависимости от типа применяемого кабеля и способа его заделки в соединитель. Его обеспечение осуществляет военный центр DESC (Defence Electronics Supply Center), Дейтон, штат Огайо, США. Параметры кабелей для военного применения регламентируются стандартом MIL-C-17.

Коммерческие соединители дешевле, так как в них применяют более дешевые конструкционные материалы и покрытия, а также сокращен объем испытаний.

## 4.2. Основные требования к соединителям

К соединителям предъявляют следующие основные требования:

1. Возможность использования в радиочастотных трактах со стандартным волновым сопротивлением 50 Ом.
2. Широкополосность, определяемая предельной верхней частотой, на которой еще сохраняются приемлемые параметры согласования. Ос-

новая тенденция развития современных соединителей – повышение их предельной рабочей частоты.

3. Минимальная величина КСВН. Коэффициент стоячей волны по напряжению является основным параметром всех соединителей СВЧ-диапазона. Величина КСВН соединителя зависит от его конструктивных особенностей и от частоты. На частотах до 18 ГГц приемлемая величина КСВН для соединителей общего применения – 1,2 (коэффициент отражения – менее 10%). КСВН измерительных и метрологических соединителей менее 1,1.
4. Минимальные потери СВЧ. Величина потерь зависит от частоты и определяется конструкцией соединителя. Для негерметичных соединителей величина потерь,  $\alpha$ , дБ, приблизительно равна:

$$\alpha \cong 0,03 \sqrt{f_{(\text{ГГц})}} . \quad (4.1)$$

На частотах до 18 ГГц допустимые величины потерь – 0,15 дБ для негерметичных и 0,3 дБ для герметичных соединителей.

5. Радиогерметичность. Соединитель должен быть хорошо экранирован, чтобы не возникала утечка электромагнитной энергии. Ранее считалось приемлемым экранное затухание на уровне (-60) дБ, в настоящее время – (-90) дБ.
6. Стабильность и воспроизводимость электрических параметров (особенно для измерительных соединителей).
7. Устойчивость к механическим, климатическим и радиационным воздействиям.
8. Надежность.
9. Герметичность. Это требование относится к КМПП и выводам энергии, устанавливаемым в корпуса герметизированных изделий микроэлектроники СВЧ. Герметичность соединителя характеризуется величиной скорости натекания через него гелия и определяется при помощи течеискателя. Допустимая скорость натекания – менее  $10^{-9}$  м<sup>3</sup>·Па/с.
10. Сохранение параметров при многократных соединениях с ответной частью в процессе настройки, измерения параметров и эксплуатации устройств СВЧ. Типичное количество циклов соединений и разъединений – не менее 500 при скорости до 12 циклов в минуту. Кроме того, в технических условиях на соединители указывают величины усилий расчленения гнездового контакта с контрольным штырем и удержания кабеля, а также допустимый момент выкручивания соединителя из корпуса изделия.

Основные параметры зарубежных соединителей разных типов приведены в таблице 4.1 [27].



Таблица 4.1. Основные параметры зарубежных соединителей

Параметры	Соединители									
	SMC	N	SMA	APC-3,5	2,9 -мм			2,4-мм		1,0-мм
					KMC-SL	OS-2,9	SMP	K	OS-2,4	APC-2,4
Предельная частота, ГГц	10	11	18	34		40		45	50	65
Максимальный КСВН	1,6	1,3	1,2	1,15	1,4	1,25	1,5	1,4	1,3	1,3
Потери, дБ (на частотах, ГГц)	0,25 (4)	0,15	$0,03\sqrt{f}$	0,09	0,25	$0,04\sqrt{f}$	$0,12\sqrt{f}$	$0,02\sqrt{f}$	$0,05\sqrt{f}$	$0,07\sqrt{f}$
Экранное затухание, дБ (на частотах, ГГц)	-60 (3)	-90 (3)	-(90-f)	-90 (16)	-90	-90	-80 (3)	-90	-(120-f)	
Допустимое количество соединений и рассоединений	500	500	1000	5000	500					
Диапазон рабочих температур, °С	-60 85	-60 165	-60 165	-40.. 85	-55 125	-65 165	-55 125	-40...85		

Примечания: 1 Приведенные значения параметров являются усредненными величинами по данным разных фирм

2 Величины КСВН приведены для прямых соединителей SMA под полужесткий кабель RG-402/U При использовании гибкого кабеля величина КСВН в диапазоне частот 0—12,4 ГГц увеличивается и равна  $1,15 + 0,02f_{\text{ГГц}}$

### 4.3. Классификация зарубежных соединителей

Первый радиочастотный соединитель UHF (ultra high frequency connector) с частотой 300 МГц был изобретен Кларком Коукенбушем из American Phenolic Co (позднее корпорация Amphenol) в 1930 году прошлого века.

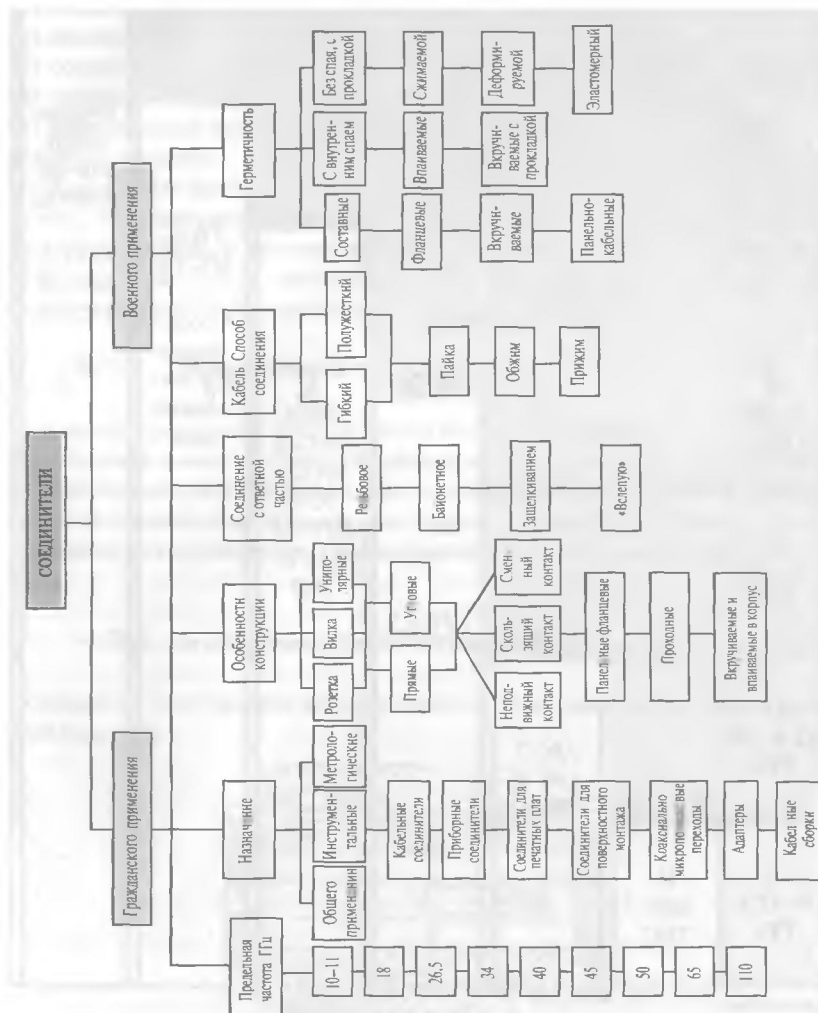


Рис. 4.1. Классификация радиочастотных соединителей

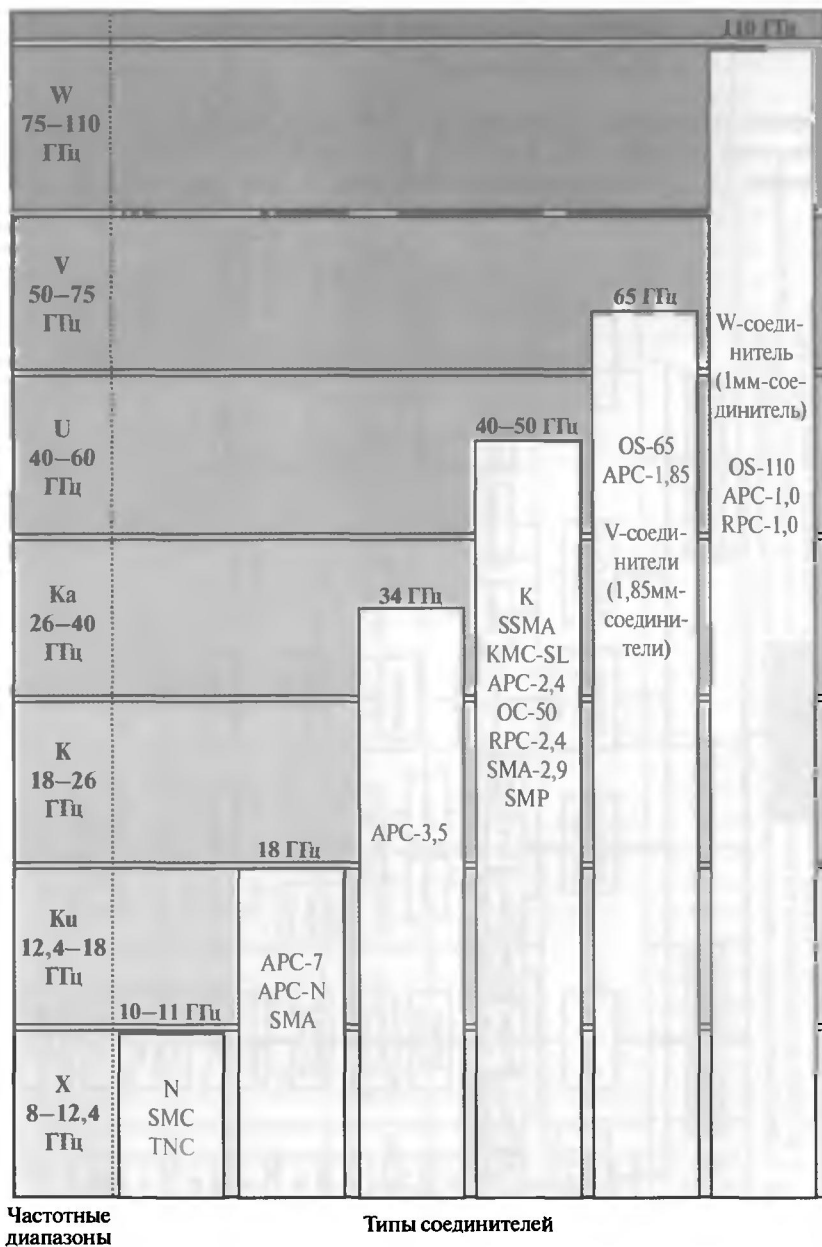


Рис. 4.2. Предельные частоты зарубежных соединителей

С тех пор было создано огромное количество соединителей разных типов. Их выпускают десятки только крупных компаний в США, Европе и Азии. Постоянно растет применение зарубежных соединителей в отечественных разработках. Поэтому необходима классификация зарубежных соединителей. Основными признаками классификации соединителей (рис. 4.1) являются:

- 1) предельная рабочая частота (частотный диапазон);
- 2) назначение;
- 3) особенности конструкции;
- 4) механизм соединения с ответной частью;
- 5) применяемый радиочастотный кабель и способ соединения с ним;
- 6) герметичность.

Ключевыми факторами при выборе соединителя являются предельная частота, тип применяемого радиочастотного кабеля и механизм соединения с ответной частью. В зависимости от назначения важны также величины КСВН и прямых потерь, герметичность, рабочий диапазон температур, особенности конструкции, условия эксплуатации и др.

#### 4.3.1. Предельная частота

Повышение предельной частоты достигают за счет применения воздушной коаксиальной линии все меньших размеров. На рисунке 4.2 показаны предельные частоты наиболее известных зарубежных соединителей. Соединители, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн, предназначены в основном для применения в широкополосной радиоизмерительной аппаратуре.

#### 4.3.2. Особенности конструкции

Соединители выпускаются в виде взаимно сопрягаемых частей: вилки и розетки (рис. 4.3).

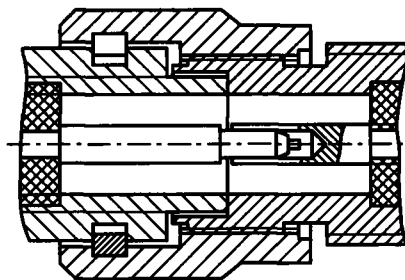


Рис. 4.3. Соединители вилка и розетка в сборе

Принадлежность соединителя к вилке или розетке определяется по его внутреннему проводнику. В розетке (female, jack) обычно применяется разрезной внутренний проводник (гнездо, цанга) в качестве приемника штыря — внутреннего проводника вилки (male, plug).

Наряду с традиционными соединителями розетка и вилка известны еще униполярные (sexless) соединители. В них использованы подпружиненные кнопочные контакты, перемещающиеся на короткое расстояние. Униполярные соединители могут сочленяться с соединителями других типов только при помощи адаптеров.

Для применения в радиоэлектронной аппаратуре разработаны соединители прямые и угловые (straight and angle right connectors).

По способу установки в корпус изделия соединители подразделяются на:

- панельные фланцевые с двумя или четырьмя крепежными отверстиями (2 and 4 hole mount connectors). Толщина стенки корпуса в месте крепления фланца винтами — не менее 3,2 мм. Крепежные отверстия под винты выполняют с дюймовой резьбой 2-56 UNC-2B;
- проходные, обычно розетка, устанавливаемые в панель (корпус) (bulkhead feedthrough receptacles);
- вкручиваемые и впайваемые в корпус выводы энергии и КМПП. Стандартные толщины стенки корпуса в месте их установки — 3,2, 4,7 и 6,4 мм;
- составные, представляющие собой сочетание собственно соединителя (разъема) и металлостеклянного СВЧ-ввода (field replaceable hermetic launchers with drop in seal — заменяемые в полевых условиях).

Классифицирование по виду контакта относится только к коаксиально-микрополосковым переходам и выводам энергии. Центральный проводник соединителей этих типов, соединяемый с микрополосковой линией, может быть неподвижным, скользящим или сменным. Неподвижный контакт (рис. 4.4) имеет круглое или прямоугольное сечение.

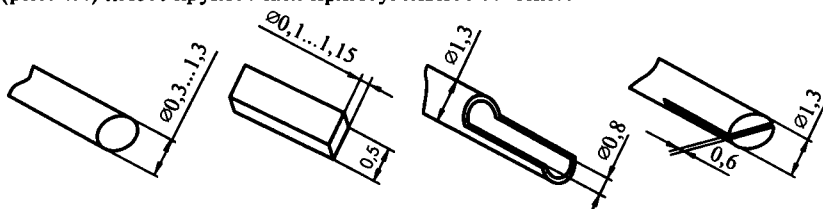


Рис. 4.4. Неподвижный контакт разных профилей сечения

Его диаметр или ширина не должны существенно отличаться от ширины полоска МПЛ.

Чем выше предельная частота соединителя, тем меньшим должен быть диаметр контакта  $d$ . В соединителях с предельными частотами от 4,0 до 10 ГГц  $d \leq 1,3$  мм, с частотами до 18 ГГц —  $d = 0,5\text{--}0,6$  мм, до 40 ГГц —  $d = 0,3\text{--}0,5$  мм, а

до 110 ГГц —  $d = 0,3$  мм. Центральный проводник прямоугольного сечения в виде плющенко удобен для непосредственного соединения с МПЛ. Техника соединения с МПЛ рассмотрена в [28].

Основное назначение скользящего контакта (sliding contact, optional socket, microstrip stress relief contact) — повышение надежности соединения МПЛ и центрального проводника КМПП при циклическом изменении температуры. Его называют еще контактом для снятия напряжений, так как он обеспечивает защиту соединения от температурных, вибрационных и ударных воздействий. Он применяется в соединителях, работающих на частотах выше 18 ГГц, и является альтернативой соединению внахлестку центрального проводника КМПП с МПЛ. Конструкции скользящих контактов, используемых фирмами M/A-COM [18], Molex [21], Suhner + Huber [29], Anritsu [30], показаны на рисунке 4.5.

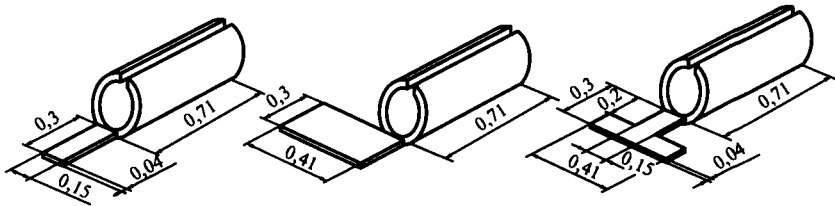


Рис. 4.5. Скользящие контакты с лепестками разной формы

Скользящий контакт представляет собой миниатюрную трубку из термически упрочненной бериллиевой бронзы, покрытой золотом, разрезанную вдоль продольной оси и имеющую на одном конце лепесток для соединения с МПЛ. При сборке такой контакт, представляющий собой цангу, надевают на центральный проводник, а лепесток припаивают к полоску МПЛ. При воздействии температуры и вибраций контакт скользит по поверхности центрального проводника соединителя, что предотвращает образование напряжений в соединении с МПЛ.

Сменный контакт (field replaceable contact), надеваемый на центральный проводник соединителя, обеспечивает возможность замены соединителя при его выходе из строя. Конструкции сменных контактов фирм M/A-COM [18], Molex [21], Southwest Microwave [19] показаны на рисунке 4.6.

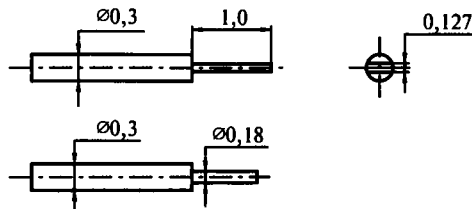


Рис. 4.6. Сменные контакты с плоским (а) и круглым (б) сечениями в области соединения с МПЛ

Их применяют для соединения с МПЛ обычно в сочетании с изоляторами из фторопласта. Наружный диаметр изолятора выбирают равным  $D = 3,2 \cdot d$ , где  $d$  — диаметр контакта.

### 4.3.3. Соединение с ответной частью

Наибольшее применение имеет резьбовое соединение (N, SMC, SMA, K, 2,4-мм, 1,85-мм и 1,0-мм соединители). На корпусе соединителя (обычно розетки) имеется резьба, а ответный соединитель (вилка) снабжен навинчиваемой гайкой. Все зарубежные соединители с предельной частотой до 50 ГГц выполняют с дюймовой резьбой на корпусе (табл. 4.2).

Таблица 4.2. Вид резьбы на корпусах зарубежных соединителей

Соединитель	Резьба	Отечественный аналог резьбы
SMA, APC-3,5, K	0 250-36 UNS-2A	M6×0 75-6g
N	0 625-24 UNEF-2A	M16×1-7g
SSMA, OSSP	0.190-36 UNS-2A	M5×0.8-6g
SMC	0 190-32 UNF-2A	
OS-50, APC-2 4, OS-65	M7×0 75-6g	M7×0 75-6g

В соединителях с предельными частотами 50, 65 и 110 ГГц применяют метрическую резьбу M7×0,75-6g. При резьбовом соединении необходимо обеспечить требуемый момент вращения накидной гайки, равный для соединителей разных типов от 0,6 до 1,7 Н.м. Для этого служат специальные тарированные ключи.

Байонетное соединение применяют в соединителях типа BNC (Bayonet Navy Connector) с предельной частотой 4 ГГц, а также в соединителях больших размеров (SHV, BNT, TPS и др.), предназначенных для работы в мегагерцовом диапазоне частот.

Соединение защелкиванием (snap-on, push-on) применяют в конструкции соединителей для устройств с высокой плотностью монтажа, особенно для многократного соединения и рассоединения печатных плат. При этом может быть обеспечено расстояние между соединяемыми платами менее 4,8 мм. Надежное соединение snap-on возможно даже при радиальной несоосности до 0,25 мм стыкуемой пары соединителей.

Первоначально оно было применено в соединителе SMB с невысокой предельной частотой (всего 4 ГГц). В настоящее время его используют и в соединителях с предельной частотой 40 и даже 65 ГГц. Соединение защелкиванием применено в соединителях SMB, SSMB MMCX, MCX, SMP, OSMP и других типов. Для его реализации на внутренней поверхности корпуса вилки делают канавку, а на наружной поверхности розетки — выступ (рис. 4.7). При

этом стыкуемая часть вилки изготовлена из упругого материала, имеет продольные разрезы и представляет собой пружинный элемент.

Известны следующие конструктивные варианты соединения snap-on:

1. Блокировка (lock-on, full detent), используемая в соединителях, работающих в условиях жесткой вибрации (рис. 4.7, а). «Detent» определяется как механизм, который временно сохраняет одну часть в определенном положении относительно другой и может быть реализован при приложении усилия к одной из частей. Для рассоединения вилки и розетки требуется специальный инструмент. Допускается до 100 циклов соединение-рассоединение.

2. Ограниченное защелкивание ((limited detent, half detent). В этом варианте диаметры выступа и канавки отличаются меньше, чем при блокировке. Рассоединение пары соединителей не требует инструмента. Допустимое количество соединений-рассоединений от 500 до 1000.

3. Скользящее соединение (slide-on, smooth bore), осуществляемое за счет распружинивания вилки после ее введения в розетку с гладкой (без канавки) внутренней поверхностью — (рис. 4.7, б). Типичное применение этого варианта — соединение и рассоединение материнской и дочерней печатных плат. Допустимое количество соединений и рассоединений — более 1000. Оно применяется в соединителях типов SMS, G и др.

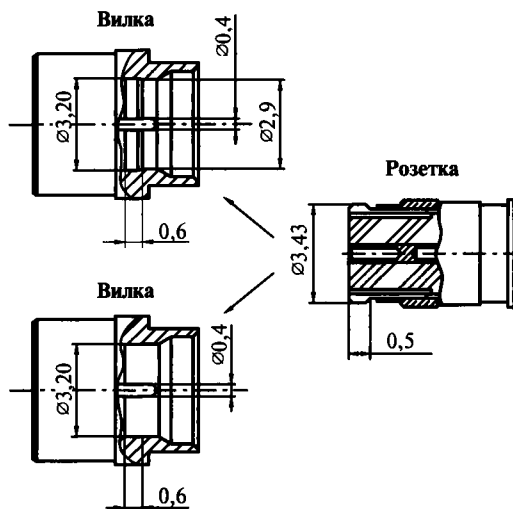


Рис. 4.7. Конструкция snap-on соединителей OSMP:  
а — блокировка, б — скользящее соединение

Оригинальная система самозащелкивающегося соединения push-pull разработана швейцарской фирмой Lemo [31]. Сопряжение разъемов происходит с помощью проталкивания штыря вилки в гнездо розетки. Надежность контакта обеспечивают две особенности соединения:



1. Корректирующий стыковку вход на гнезде, который гарантирует соединение даже при несоосности вилки и розетки.
2. Оригинальная конструкция вилки, изготовленной из металла с требуемыми упругими свойствами.

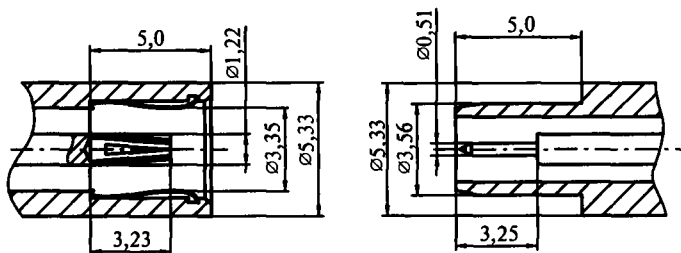


Рис. 4.8. Конструкция blind mate соединителей OSSP розетка (а) и вилка (б)

Соединение «вслепую» (blind mate) названо так, по-видимому, из-за возможности надежного многократного контактирования пары соединителей даже при радиальной несоосности 0,1 мм при жесткой установке и до 0,5 мм при плавающей установке. Это соединение применено в соединителях OSP, OSSP (рис. 4.8) [18, 21]. Для его реализации на внутренней поверхности стыкуемой части розетки смонтирован пружинный элемент, который удерживает вилку после стыковки пары соединителей. Допустимое количество циклов соединение-рассоединение — 1000. Параметры согласования пары соединителей не ухудшаются, даже если между ними имеется зазор до 0,38 мм. Следует подчеркнуть, что для сочетания соединителей, в которых использованы соединения snap-on и blind mate, со стандартными резьбовыми соединителями необходимы соответствующие адаптеры

#### 4.3.4. Кабель. Способ заделки в соединители

Выбирать зарубежный соединитель необходимо совместно с соответствующим ему радиочастотным кабелем. В таблице 4.3 приведены параметры наиболее применяемых радиочастотных кабелей для соединителей разных типов. Обозначение кабеля, например RG174/U, означает: RG (radio guides), номер — 174, U (universal). Кабели серии RG серийно производят многие зарубежные фирмы (Belden, Leoni, Lapp, Western Electric, Core Microwave и др.).

Разработаны кабели двух основных типов: гибкие и полужесткие. Гибкие кабели более удобны в обслуживании, но их параметры хуже, чем у полужестких кабелей. Зарубежные фирмы приводят параметры соединителей только в сочетании с кабелем определенного типа. Например, базовый соединитель SMA рекомендуется применять с гибким кабелем на частотах до 12,4 ГГц, а с полужестким кабелем — от 18 до 26,5 ГГц. Соединители с предельными частотами выше 34 ГГц сочетаются только с полужесткими кабелями.

Таблица 4.3. Радиочастотные кабели, применяемые с соединителями разных типов

Тип кабеля	Диаметр, мм		Рабочий диапазон температур, °C	Соединители							
	Наружный	Центрального проводника		SMC	N	SMA	APC-3,5 OC-2,9 K	SMP	OS-50	OS-65 APC-2,4	OS-1,0
Гибкий кабель											
RG-55	5,5	0,81	-40...+80		+	+					
RG-58	4,95	0,95	-40...+80		+	+					
RG-142	4,95	1	-55...+250		+	+					
RG-174	2,5	0,51	-40...+80	+	+	+					
RG-179	2,5	0,3	-55...+150	+		+					
RG-188	2,8	0,51	-55...+250	+	+	+					
RG-316	2,6	0,51	-55...+250	+	+	+					
Полужесткий кабель											
0,141* (RG-402)	3,58	0,91	-40...+125		+	+					
0,085* (RG-405)	2,2	0,51			+	+	+	+	+		
0,118*	3,0	0,51					+				
0,096*	2,44	0,51							+		
0,047*	1,2	0,3						+	+	+	+

Заделку кабеля в соединитель осуществляют следующими способами: пайкой (solder), прижимом (clamp) и обжимом с деформацией (crimp). Центральный проводник кабеля соединяют с внутренним контактом соединителя пайкой или обжимом. Наружный проводник гибкого кабеля (оплетку) заделывают в соединитель прижимом или обжимом с деформацией.

Надежнее, производительнее и обеспечивает идентичность параметров от сборки к сборке обжатие с деформацией – стандартный гексагональный обжим (hex. crimp) и обжим «0» – crimp, предложенный американской фирмой AMP [32]. Однако для их осуществления необходим набор специальных инструментов в зависимости от типа кабеля. Этим способом можно соединять и внутренние, и наружные проводники кабеля и соединителя (full crimp – полный обжим).

Соединение clamp не столь надежно и воспроизводимо, как crimp, но не требует специального инструмента и пригодно для полевых условий обслуживания изделий.

Соединение внутренних и наружных проводников полужесткого кабеля и соединителя наиболее надежно путем пайки.

Ведущие фирмы – производители соединителей в своих каталогах и технической документации дают подробные инструкции по выбору и заделке кабеля, а также предлагают набор инструментов для этого.

#### 4.3.5. Герметичность

Требование герметичности предъявляют только к КМПП и частично – к выводам энергии и адаптерам. Само понятие «герметичность» без указания величины скорости натекания гелия (или другого газа) через соединитель не имеет практического смысла. Известны 3 уровня герметичности соединителей [27]:

1. Герметичность не регламентируется и поэтому не гарантируется. Обычно это соединители, герметизированные органическими диэлектриками.

2. Скорость натекания  $(1,3 \times 10^{-6} - 1,3 \times 10^{-7}) \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$  ( $10^{-5} - 10^{-6}$ ) cc/s\* – средний уровень герметичности. Такой уровень обеспечивают, например, пластмассовые корпуса микросхем.

3. Скорость натекания  $(1,3 \times 10^{-9} - 1,3 \times 10^{-11}) \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$  ( $10^{-8} - 10^{-10}$ ) cc/s – высокий уровень герметичности (вакуумная плотность) соединителя. Такую скорость натекания определяют масс-спектрометрическим методом при помощи гелиевого течеискателя.

Соединители среднего уровня герметичности нежелательно применять в надежных изделиях с большим сроком сохраняемости. Их используют в изделиях менее ответственного назначения или кратковременного действия (до 100 часов непрерывной работы). Герметичность таких соединителей обес-

\* cc/s – единица скорости натекания кубический сантиметр в секунду при нормальном давлении  
1 cc/s =  $0,13 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$

печивается за счет внутреннего металlostеклянного спая, а их герметизация в корпусе изделия осуществляется при помощи уплотняющей прокладки.

Для герметизации соединителя в корпусе изделия используют металлические прокладки: жесткие, сжимаемые и деформируемые. Жесткие прокладки применяют в корпусах, изготовленных из твердых металлов (нержавеющей стали, сплава 29 НК) или из алюминиевых сплавов при большой толщине стенки корпуса.

Сжимаемые прокладки выполняют из сплава 29НК и применяют в корпусах из алюминиевых сплавов.

Деформируемые прокладки из пластичных металлов (меди и алюминия) необходимы, если приходится многократно устанавливать и демонтировать соединитель и при этом недопустимо повреждение корпуса изделия.

Герметизацию соединителя эластомерной прокладкой применяют, если требуется его многократная установка и снятие. Ее производят путем сдавливания и плотного прижатия к поверхностям соединителя и корпуса изделия прокладки круглого или прямоугольного сечения толщиной 0,8–1,5 мм. Герметичность же самого соединителя обеспечивает металlostеклянный ввод, впаянный в корпус соединителя. Для предотвращения ухудшения радиогерметичности\* соединителя эластомерные прокладки изготавливают из токопроводящей резины. Проводимость обеспечивает мелкодисперсный порошок серебра, меди или графита, введенный в состав резины.

Существуют следующие основные типы герметичных соединителей [22]:

1. Составные: миниатюрный металlostеклянный 50-Омный ввод с центральным проводником диаметром 0,3, 0,46 или 0,5 мм в сочетании с собственно соединителем (СВЧ-разъемом).

2. С внутренним металlostеклянным спаем, впаяваемые в корпус изделия или вкручиваемые и герметизируемые в нем при помощи металлической или эластичной прокладок.

3. Без внутреннего металlostеклянного спая, вкручиваемые в корпус изделия и герметизируемые в нем при помощи деформируемой металлической или эластомерной прокладок.

Все соединители (кроме панельно-кабельных) выпускают в варианте розетка или вилка, с неподвижным, скользящим или сменным контактами. Способы установки соединителей в корпуса изделий рассмотрены в [18, 2–24, 26].

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

### 5.1. Обеспечение надежности контактирования соединителей розетка и вилка

Основными элементами конструкции соединителя являются корпус (наружный проводник), внутренний (гнездовой или штыревой) проводник и изолятор. Все соединители имеют две пары концентрично расположенных контактных пар. Внутренняя пара состоит из штыря и гнезда. При введении штыря в гнездо с определенным усилием, создаваемым пружинящими элементами гнезда — ламелями, происходит электрическое соединение внутренней контактной пары. Контакт наружных проводников образуется за счет резьбового, реже байонетного соединения или соединения защелкиванием. Сочлененная пара соединителей — вилка и розетка — представляет собой не-отражающее внутреннее соединение.

Обеспечение надежности контактов внутреннего и наружного проводников, испытывающих многократные соединения и механические воздействия, является одной из сложнейших задач. В результате многократных соединений наружные проводники деформируются прежде всего вследствие малости площади их соприкосновения. Например, для соединителей SMA толщина стенки наружных проводников в области контакта менее 0,23 мм. Правда, с повышением частоты толщина стенки увеличивается — для соединителей с предельной частотой 34 ГГц она возрастает более чем в 2 раза (до 0,51 мм).

Значительно сложнее обеспечить надежность контакта гнездового и штыревого внутренних проводников соединителя.

#### Гнездовой контакт

Количество ламелей у гнезд разных типов — от 2 до 6. Ширина прорезей между ламелями — 0,1–0,2 мм, длина ламелей равна  $(1-1,5) \cdot d$ , где  $d$  — наружный диаметр гнезда [2]. Прорези параллельны продольной оси гнездового контакта, т.е. параллельны линиям токов СВЧ. Благодаря контакту ответного штыря только с концами ламелей обеспечивается минимальный путь этих токов. Тонкостенный гнездовой контакт (толщина стенки 0,1–0,3, внутренний диаметр — 0,25–0,9 мм для соединителей разных типов) является их на-

иболее уязвимым местом. Даже незначительное нарушение центровки гнезда и штыря при соединении пары соединителей может привести к отгибанию одной из ламелей гнезда и даже к ее поломке (рис. 5.1).

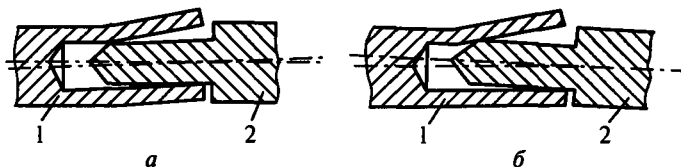


Рис. 5.1. Деформация ламели гнезда вследствие смещения осей гнезда и ответного штыря (а) или их наклона (б)

При этом нарушается контакт внутренних проводников и ухудшается КСВН соединителя. Это обусловлено еще и тем, что при существующих присоединительных размерах соединителей ответный штырь может входить в гнездо до того, как произойдет контактирование их наружных проводников. При несоосном расположении соединителей при их сочленении штырь упирается в одну из ламелей и отгибает ее. Для избежания этого необходимо, чтобы длина штыря ответной части не превышала 1,52 мм вместо обычно имеющих 2,54 мм. Столь простое решение проблемы поломки гнездовых соединителей, предложенное еще в 1983 г. специалистами фирмы Wiltron, США [33], к сожалению, не всегда учитывается до сих пор.

Нарушение внутреннего контакта соединителя может иметь самые серьезные последствия. Так, в 1975 г. в США был приостановлен запуск космического корабля «Викинг-2», из-за того что неисправный контакт соединителя недопустимо уменьшал коэффициент усиления антенны [34].

Недостаточная надежность гнездового контакта в стандартных соединителях типа SMA, широко применяемых в радиоизмерительной аппаратуре, — давняя проблема при эксплуатации этой аппаратуры [35]. Для соединителей с воздушной коаксиальной линией, в которых отсутствует диэлектрик, поддерживающий внутренний проводник, положение усугубляется еще больше.

В связи с этим постоянно ведется поиск более надежной конструкции гнездового контакта. Основными параметрами такого контакта являются: контактное сопротивление, усилие расчленения гнезда с контрольным штырем и допустимое количество циклов соединений и разъединений. Контактное сопротивление включает в себя сопротивление контактирующих гнезда и штыря и их переходное сопротивление. Величину контактного сопротивления обычно нормируют для постоянного тока, а не для реальных токов СВЧ. Поэтому величина контактного сопротивления является лишь качественной характеристикой технического состояния

контактов [25]. При воздействии на соединитель вибрационных и ударных нагрузок может происходить изменение площади контактирующих поверхностей и появление неустойчивости переходного сопротивления. Эта неустойчивость является причиной возникновения так называемых виброшумов, уменьшающих чувствительность аппаратуры СВЧ [25].

Усилие расчленения гнезда с контрольным штырем (калибром) является характеристикой контактного давления, создаваемого упругими элементами контактов. Контактное давление определяется жесткостью упругого элемента и величиной его деформации [25]. Для обеспечения наибольшей стабильности контактного давления необходимо, чтобы жесткость упругих элементов была наименьшей, а их деформация как можно большей. Чем меньше величина контактного давления, тем меньше устойчивость контактов к воздействию механических нагрузок и стабильность их контактного сопротивления. С возрастанием же контактного давления уменьшается износостойкость контактов при многократных соединениях [25]. Поэтому в технических условиях на соединители величина усилия расчленения имеет двустороннее ограничение.

Так как износ контактов уменьшается при снижении контактного давления и увеличении площади контакта, взамен стандартных гнезд с 2 ламелями (рис. 5.2, а) были разработаны гнезда с 3 и 4 ламелями (рис. 5.2, б).

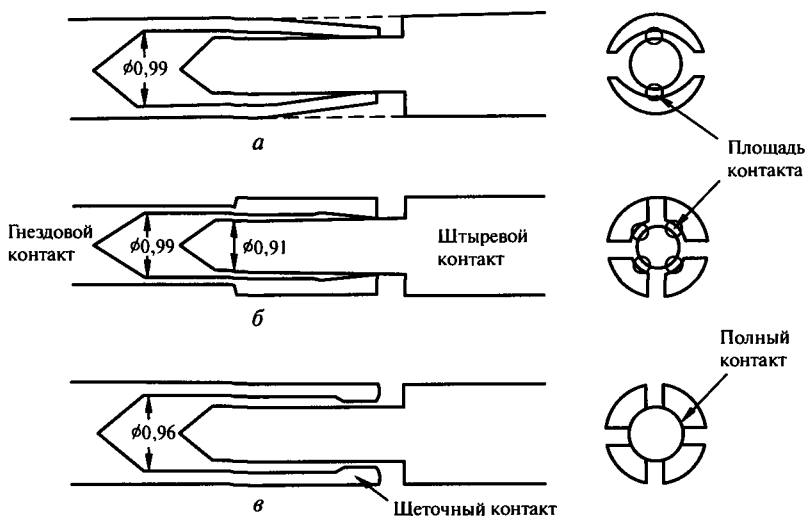
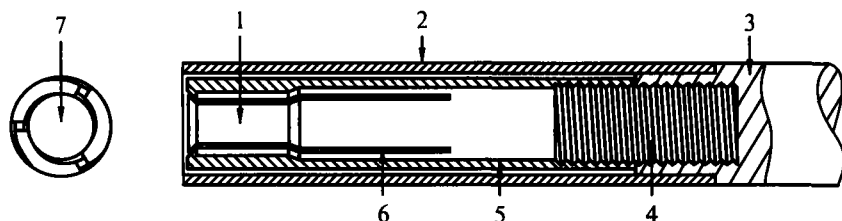


Рис. 5.2. Конструкции гнездовых контактов:

а — стандартное гнездо с 2 ламелями, б — компенсированное гнездо с 4 ламелями,

в — гнездо с 4 ламелями и щеточными контактами.

Диаметр ответного штыря — 0,94 мм (макс)



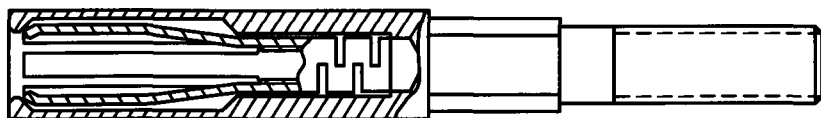
**Рис. 5.3.** Конструкция гнездового контакта повышенной надежности  
1 – контактирующая поверхность, 2 – запрессованная наружная трубка, 3 – наружный проводник, 4 – соединительная шпилька, 5 – сменная внутренняя трубка с резьбой, 6 – продольные прорезы под углом  $120^\circ$ , 7 – штырь

Опыт их применения показал, что они менее чувствительны к неточности их геометрических размеров и несоосности гнезда и штыря в момент соединения [35]. Дальнейшее усовершенствование заключалось в утолщении ламелей гнезда в области контакта со штырем – рисунок 5.2, б и создании гнезд со щеточными контактами – 5.2, в.

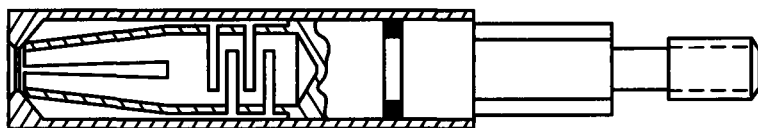
Благодаря щеточному контакту допустимое количество соединений и разъединений увеличивается приблизительно в 2 раза [35]. По данным авторов работы [2] такие гнезда обеспечивают 10000–15000 циклов соединений и разъединений

В 1979 году фирмой Wiltron [36] было предложено оригинальное конструктивное решение гнездового контакта – рисунок 5.3.

Внутренний проводник гнезда состоит из 2 трубок, расположенных одна в другой. Внутренняя трубка заканчивается цангой с 3 ламелями, и при помощи миниатюрной шпильки соединяется с центральным проводником. Наружная трубка запрессована в центральном проводнике. Внутренний проводник изготовлен из тонкостенной трубки из нержавеющей стали и для повышения электропроводности покрыт слоями серебра и золота. Диаметр контактной поверхности внутреннего проводника равен диаметру штыря



а



б

**Рис. 5.4.** Гнездовые контакты соединителей APC-3,5 (а) и APC-2,4 (б)



ответного соединителя (для обеспечения минимального износа контакта). Вероятность разрушения гнездового контакта значительно уменьшается, так как внутренний проводник удерживается наружной трубкой. В случае повреждения внутренняя и наружная трубки могут быть заменены даже в полевых условиях. Такая конструкция гнездового контакта гарантирует до 30000 соединений и разъединений (вместо обычных 500–1000) без существенного ухудшения параметров соединителя [36].

На рис. 5.4 показаны конструкции усовершенствованных гнездовых контактов прецизионных соединителей APC-3,5 и APC-2,4 [36].

Еще одна конструкция усовершенствованного гнездового контакта для соединителей с воздушной коаксиальной линией была разработана фирмой Kryptar Inc, США в 1981 году – рисунок 5.5 [37].

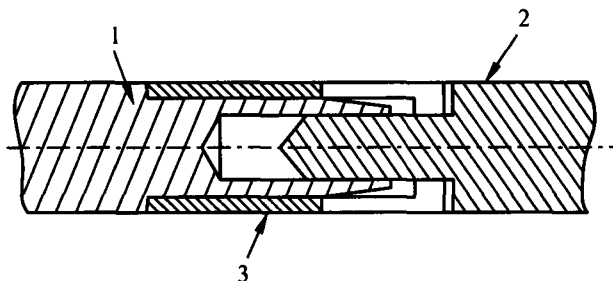


Рис. 5.5. Гнездовой контакт с центрующей насадкой:  
1 – гнездо, 2 – ответный штырь, 3 – насадка

Для повышения точности центровки гнезда и штыря гнездовой контакт снабжен насадкой – ловителем штыря. Само гнездо выполнено без ламелей, а его внутренний диаметр приблизительно на 0,05 мм больше диаметра ответного штыря. Насадка же выполнена с 4 ламелями, ее внутренний диаметр равен диаметру ответного штыря. Насадка припаивается или приваривается к гнездовому контакту, защищает его и ответный штырь от износа и поломки, обеспечивая при этом хороший электрический контакт.

Наконец, принципиально новым решением повышения надежности внутреннего проводника является создание униполярных соединителей [38, 39]. Униполярный соединитель имеет идентичные контактные стороны на розетке и вилке. Электрический контакт униполярных соединителей обеспечивается за счет контактного нажатия на неохватываемые друг другом контактные элементы.

Следует подчеркнуть, что усовершенствование гнездовых контактов связано со значительным усложнением технологии их изготовления и, следовательно, с удорожанием соединителей. Поэтому с самого начала более надежные и прецизионные соединители предназначались для использования

в дорогостоящей измерительной аппаратуре и в устройствах повышенной надежности.

## 5.2. Конструирование изоляторов соединителей

Изолятор в соединителях либо полностью заполняет пространство между внутренним и наружным проводниками, либо применяется в виде опорных шайб. Он выполняет следующие функции:

- фиксация внутреннего проводника относительно наружного,
- изоляция этих проводников,
- развязка между внутренними проводниками соединителей и внутренними проводниками устройства СВЧ (предотвращение передачи механических усилий в устройство),
- герметизация соединителя и самого устройства и защита от воздействия климатических факторов [2, 25].

Выполняя эти функции, изолятор одновременно является неоднородностью в коаксиальной линии соединителя и источником отражений и помех. В диапазоне СВЧ геометрические размеры изолятора (опорной шайбы) соизмеримы с длиной волны, поэтому в области изолятора возникает скачок волнового сопротивления. Важнейшей задачей является создание изоляторов, вносящих минимальные потери и рассогласование в коаксиальном тракте СВЧ.

В первом приближении изолятор представляет собой отрезок коаксиальной линии с однородным диэлектрическим заполнением. Компенсацию отражений в такой линии производят путем оптимального выбора конфигурации и толщины изолятора и соотношения диаметров наружного и внутреннего проводников – рисунок 5.6.

Геометрические размеры изолятора, внутреннего и наружного проводников в области изолятора рассчитывают из условия равенства волновых сопротивлений линии в ее областях с изолятором и без него. При этом вол-

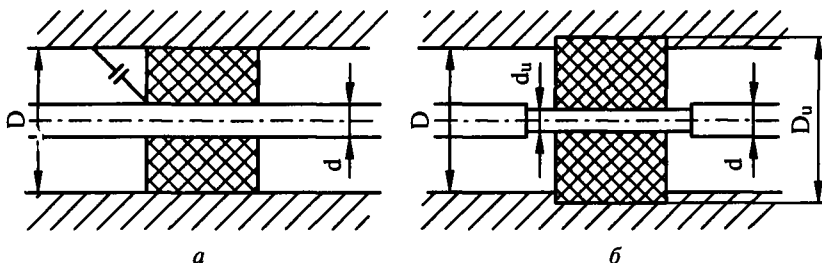


Рис. 5.6. Линия с однородным диэлектрическим заполнением без компенсации (а) и с компенсацией (б)

новое сопротивление в любом сечении линии должно быть равно стандартному — 50 Ом. Зная величину диэлектрической проницаемости материала изолятора —  $\epsilon$ , можно рассчитать отношение диаметров  $D_u/d_u$  по формуле:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D_u}{d_u} = 50 \text{ Ом} . \quad (5.1)$$

Чтобы определить диаметры  $D_u$  и  $d_u$  можно воспользоваться соотношением, приведенным в [2]:

$$D_u = K(\epsilon) \cdot D . \quad (5.2)$$

Величина коэффициента  $K(\epsilon)$  зависит от диэлектрической проницаемости материала изолятора. Для фторопласта ( $\epsilon = 2,0 \dots 2,1$ )  $K(\epsilon) \approx 1,1$ , для стекла марки С 52-1 ( $\epsilon = 5,2$ ) —  $K(\epsilon) \approx 1,35$ .

Уточненная модель изолятора, учитывающая наличие емкостных неоднородностей, возникающих из-за изменения геометрических размеров, достаточно сложна и поддается только машинному расчету [2]. Расчетные оптимальные размеры коаксиальной линии с диэлектриком затем уточняют по результатам экспериментальной проверки.

Необходимо подчеркнуть, что наличие изолятора с  $\epsilon > 1$  и увеличение его наружного диаметра  $D_u$  обуславливают заметное снижение критической частоты соединителя. В коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах относительно толстые опорные диэлектрические шайбы могут резонировать на волне  $H_{11}$ . Это обстоятельство ограничивает предельную рабочую частоту соединителя. Для увеличения предельной частоты приходится уменьшать диэлектрическую проницаемость изолятора за счет замещения части материала изолятора воздухом. Такие компенсированные изоляторы имеют достаточно сложную форму с проточками и со сквозными и несквозными отверстиями — [2, 11, 27, 33]. Моделировать воздушно-диэлектрические изоляторы можно только численно [2].

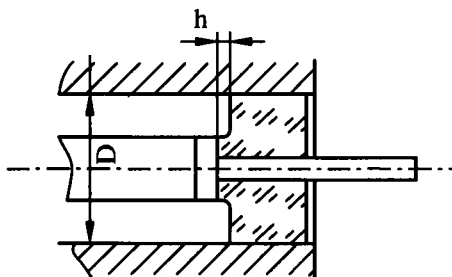


Рис. 5.7. Компенсированный стеклянный изолятор

На рисунке 5.7 показана оригинальная конструкция компенсированного стеклянного изолятора герметичного КМПП с воздушной коаксиальной линией [40].

Глубину выборки стекла  $h$  (мм) выбирают равной:

$$h = \left( \frac{1}{12} \dots \frac{1}{18} \right) D, \quad (5.3)$$

где  $D$  — внутренний диаметр наружного проводника, мм.

Для соединителя диаметром  $D = 3,5$  мм  $h = 0,2\text{--}0,3$  мм.

### 5.3. Материалы и покрытия

В зависимости от требований к герметичности для изготовления корпусов соединителей применяют 2 группы металлов. Корпуса соединителей, герметичность которых не регламентируется (кабельных соединителей, адаптеров), изготавливают из нержавеющей стали, бериллиевой бронзы или латуни. При этом корпуса соединителей военного назначения изготавливают только из нержавеющей стали или из бериллиевой бронзы. Материалом корпуса более дешевых коммерческих соединителей обычно является латунь.

Корпуса герметичных (вакуумноплотных) соединителей изготавливают из металлов, образующих надежные спаи со стеклянным изолятором. В отечественной практике для этой цели применяют сплав 29НК или сталь 15Х25Т. Сплав 29НК предназначен для получения согласованных по величине коэффициентов термического расширения спаев со стеклом марки С52-1. Его недостатком являются невысокие износостойкость и коррозионная стойкость в условиях повышенной влажности и температуры. Сталь 15Х25Т имеет более высокую износостойкость по сравнению со сплавом 29НК. КТР стали приблизительно в 2 раза больше КТР стекла марки С52-1, поэтому ее применяют для получения охватывающих сжатых спаев с этим стеклом.

Внутренний проводник изготавливают из латуни или бериллиевой бронзы. В качестве материала проводников герметичных соединителей обычно применяют сплав 29НК. Гнездовой контакт соединителей всегда изготавливают из бериллиевой бронзы, так как она удачно сочетает хорошие упругие свойства с достаточно высокой электропроводностью.

Механическую обработку внутреннего и наружного проводников, требующих высоких точности геометрических размеров (10–50 мкм) и чистоты поверхности, производят на часовых станках с числовым программным управлением. За рубежом для этой цели применяют высокопроизводительные автоматизированные обрабатывающие центры.

Изготовление гнездовых контактов из бериллиевой бронзы имеет некоторые особенности. После токарной обработки и резки прорезей между

ламелями фрезерованием или электроискровой обработкой проволочным электродом производят закалку бериллиевой бронзы. В отличие от сталей, закаленная бронза становится пластичной, что позволяет произвести обжатие ламелей гнезда. Упругие свойства ламели приобретают в результате последующего отпуска бронзы. Ее микротвердость после отпуска должна быть не менее 315 кгс/мм<sup>2</sup>.

Для уменьшения прямых потерь СВЧ, повышения коррозионной стойкости и обеспечения паяемости соединителей (при установке в корпуса изделий) на внутренний и наружный проводники наносят гальванические покрытия. К покрытиям предъявляются следующие требования: высокая электропроводность, износостойкость, высокая коррозионная стойкость, паяемость легкоплавкими припоями. Все покрытия имеют ту или иную степень пористости. В связи с этим, для того чтобы покрытие представляло собой высокопроводящий слой, его толщина должна быть в несколько раз больше глубины «скин-слоя».

Лучшим покрытием является износостойкое золото: сплавы золота с кобальтом, никелем или сурьмой. Электролитически нанесенный сплав золото-кобальт (золото — 99,9%) образует твердое (микротвердость не менее 190 кгс/мм<sup>2</sup>) износостойкое покрытие с низким контактным сопротивлением (0,4 мОм) [41]. Толщина золотого покрытия обычно не более 2–3 мкм с целью экономии драгоценного металла. В зарубежных соединителях внутренние проводники всегда покрывают золотом.

Гнездовые контакты отечественных соединителей обычно покрывают износостойким сплавом серебро-сурьма толщиной 6 мкм. Серебряные покрытия немагнитные, имеют самое низкое контактное сопротивление, высокую коррозионную стойкость и износостойкость (обеспечивают не менее 1000 циклов соединение-рассоединение), а также хорошую паяемость. Однако серебряные покрытия при эксплуатации и во время хранения тускнеют в результате взаимодействия с серосодержащими соединениями из окружающей среды.

Кроме золотого применяют покрытие гнездовых контактов сплавом палладий-никель (80% палладия) толщиной 6 мкм. Электропроводность такого покрытия хуже, чем у серебряного и золотого, но оно имеет высокую износостойкость и коррозионную стойкость и лучшую паяемость по сравнению с чистыми никелевым или палладиевым покрытиями.

Корпуса коммерческих соединителей нередко покрывают никелем и сплавом олово-висмут (99,7% олова). В зарубежных соединителях широко применяются покрытия корпусов сплавами «белая бронза», Suroplate (сплав меди, олова и цинка), Suropro (тонкий слой золота поверх покрытия никель-фосфор с содержанием фосфора 13%), Optalloy [29]. На корпуса соединителей, изготовленные из нержавеющей стали, часто не наносят покрытия, ограничиваясь полировкой и пассивацией поверхности.

Изоляторы соединителей, герметичность которых не регламентируется, изготавливают из органических диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью и малыми потерями. К таким диэлектрикам относятся: фторопласты 4, 40, 42, 50, полиэтилен ВД, полистирол марки Д, сополимеры САМ-Э и САМ-3, темплен. Диэлектрическая проницаемость этих материалов лежит в пределах от 2,1 (для фторопласта 4) до 2,55 (для полистирола). Наибольшее применение нашли фторопласт 4, а также сополимер САМ-Э и темплен [2].

Фторопласт — чрезвычайно инертный материал, получаемый из водных эмульсий. Он имеет следующие характеристики:

Удельное объемное сопротивление .....	$10^{18}$ Ом·см;
Электрическая прочность .....	18 кВ·мм;
Диэлектрическая проницаемость	
на частоте 10 ГГц .....	2,1;
Тангенс угла диэлектрических потерь	
на частоте 10 ГГц .....	$3 \cdot 10^{-4}$ ;
Деформационная теплостойкость .....	121°C;
Допустимая температура нагрева .....	260°C;
Коэффициент термического расширения .....	$1,1 \times 10^{-4}$ 1/°C;
Водопоглощение .....	0,
Предел прочности .....	2100 Н/см <sup>2</sup> ;
Относительное удлинение .....	200 %

Фторопласт сохраняет электрические свойства при температурах от -183 до 260°C. Он не обладает адгезией к различным покрытиям. Недостатком фторопласта является его высокая хладотекучесть, не позволяющая обеспечить высокую точность геометрических размеров изолятора.

Для изготовления изоляторов зарубежных соединителей сантиметрового и особенно миллиметрового диапазонов длин волн применяют органические материалы: полиэтиленоксид (РРО), Rexolit, Картон.

Изоляторы простой конфигурации изготавливают методами механообработки. Для изготовления сложных изоляторов применяют литье под давлением в пресс-формах. Этот способ особенно эффективен при изготовлении в единой конструкции изолятора с закрепленным в нем внутренним проводником.

В герметичных соединителях изоляторы, спаянные с внутренним и наружным проводниками, изготавливают из порошкового или монолитного стекла. Изоляторы из монолитного стекла изготавливают, используя стеклянные капилляры. Капилляры шлифуют по наружному диаметру на станке бесцентрового шлифования, нарезают на таблетки с припуском на высоту и затем производят тонкую шлифовку торцов таблетки. Точность геометрических размеров стеклянного изолятора должна быть высока: допуски на его наружный диаметр и высоту — не более 40 мкм. Изоляторы из порошкового стекла получают прессованием порошка стекла со связкой и последующим выжигом связки.

#### 5.4. Способы крепления внутреннего проводника и изолятора в корпусе соединителя

Крепление изолятора и внутреннего проводника в корпусе необходимо для предотвращения их продольного перемещения и проворачивания при эксплуатации соединителя. При этом не должны существенно ухудшаться параметры согласования соединителя. Существует несколько способов крепления. При изготовлении измерительных соединителей часто применяют так называемые «модульные» изоляторы, в которых в единой конструкции объединены внутренний проводник, изолятор и металлическое кольцо, охватывающее изолятор. «Модульные» изоляторы получают литьем под давлением и закрепляют в корпусах соединителей пайкой низкотемпературным припоем.

Некоторые способы сборки соединителей, изготовленных из отдельных деталей (корпуса, внутреннего проводника и изолятора), показаны на рисунке 5.8 [42].

Наибольшее распространение получил запатентованный в США (патент № 3.292.117) способ крепления столбиком прочного эпоксидного компаунда (рис. 5.8, а). В корпусе и изоляторе делают сквозное отверстие, на гнездовом контакте — кольцевую канавку. В образовавшееся пространство

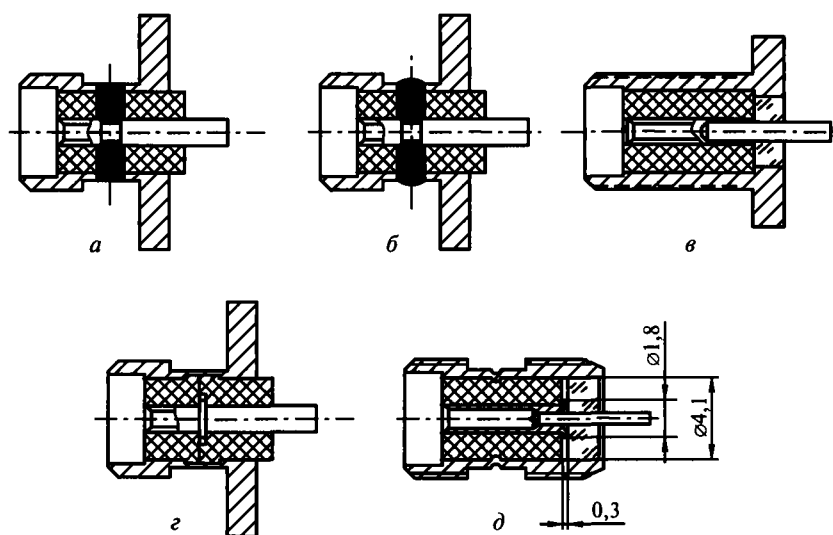


Рис. 5.8. Способы крепления внутреннего проводника и изолятора в корпусе:  
а — столбиком компаунда; б — с дополнительным проводящим компаундом;  
в — пайкой; г, д — буртиком

вводят эпоксидный компаунд, который после затвердевания обеспечивает надежное крепление деталей соединителя. Способ чаще всего применяют в зарубежных КМПП, центральный проводник которых припаивают к микрополосковой линии. В этом случае гарантируется отсутствие продольного смещения и поворота проводника, которые могли бы привести к повреждению МПЛ и выходу из строя всего устройства. Недостатком рассмотренного способа является возможность утечки энергии СВЧ через эпоксидный компаунд и ухудшение экранного затухания соединителя.

Для устранения этого недостатка на наружную поверхность эпоксидного слоя дополнительно наносят слой проводящего компаунда также на основе эпоксидной смолы (рис. 5.8, б).

В герметичных КМПП используют способ крепления, показанный на рисунке 5.8, в. Гнездовой контакт надевают на центральный проводник, впаянный в стеклянный изолятор, и получают их неразъемное соединение пайкой низкотемпературным припоем, используя оснастку для центровки. При этом необходимо, чтобы температура пайки не превышала 380°C, так как при более высоких температурах снижается упругость ламелей и происходит интенсивная диффузия золота с поверхности в материал гнезда. Фторопластовый изолятор надевают на образовавшийся внутренний проводник и закрепляют в корпусе запрессовыванием, клеиванием или пуклеванием. Вклеивание фторопласта требует его специальной предварительной обработки тлеющим разрядом. Заметим также, что ни один из этих способов не обеспечивает герметичного (вакуумноплотного) соединения фторопластового изолятора с корпусом.

Еще один способ крепления буртиком показан на рисунке 5.8, г. Изолятор состоит из двух частей с проточками в области размещения буртика. Этой же цели служит проточка на корпусе, в который запрессовывают изолятор. По сравнению с другими способами механического крепления такой способ наилучшим образом предотвращает продольное смещение внутреннего проводника и изолятора, но не гарантирует их от проворачивания в корпусе.

Способ крепления внутреннего проводника при помощи буртика, упирающегося в торец изолятора, показан на рисунке 5.8, д. Толщина такого буртика приблизительно равна 0,3 мм, а его диаметр должен быть таким, чтобы при неизменном внутреннем диаметре корпуса волновое сопротивление в этом сечении было равно 50 Ом. Например, при диаметре корпуса 4,1 мм диаметр буртика должен быть равен 1,8 мм.



# ЗАРУБЕЖНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

### 6.1. Соединители SMA

В 1958 году J. Cheal из Bendix Research Laboratory (США) разработал первый миниатюрный соединитель с предельной частотой 10 ГГц для системы активного доплеровского радара. Этот соединитель получил название BRM (Bendix Research Miniature). В результате его усовершенствования фирмой M/A-COM Omni-Spectra (США) в 1962 году появился соединитель OSM. В дальнейшем его «дорабатывали» многие фирмы. Законченная конструкция соединителя получила название SMA (Subminiature Grade A). Герметичный соединитель SMA появился в 1963 году. С 1968 года он выпускается также по стандарту MIL-C-39012 для использования в аппаратуре военного назначения. Первым «серьезным» применением соединителей SMA и полужестких кабелей была радарная система, созданная лабораторией прикладной физики университета J. Hopkins и фирмой Westinghouse [43].

В течение многих лет соединители SMA являются наиболее широко применяемыми при создании усилительных, генераторных, приемо-передающих и преобразовательных модулей, радиотехнических блоков и устройств СВЧ. Они малогабаритны, обеспечивают высокочастотное согласование в полосе частот до 18 ГГц\* и до настоящего времени остаются «рабочей лошадкой» микроэлектроники СВЧ [44, 45].

Если принять объем продаж всех радиочастотных соединителей за 100%, то доля соединителей SMA приблизительно 40%. В объеме же продаж только миниатюрных радиочастотных соединителей доля SMA превышает 60% [47]. Соединители SMA производят десятки фирм Америки, Европы и Азии: M/A-COM [18, 42], Tyco (AMP) [32, 49], Molex [21], SV Microwave [50], Southwest Microwave [19], Pasternack [51], Amphenol [52] (все США), Radiall (Франция) [22, 48, 55], Huber + Shuner (Швейцария) [29], Spectrum Elektrotechnik (Германия) [53], KMW (Республика Корея) [54] и др.

При современной развитой кооперации такое большое количество фирм, выпускающих однотипную продукцию, можно объяснить двумя обстоятельствами:

---

\* Теоретическая частота, при которой в соединителе еще не возникают волны высшего типа, — 26,5 ГГц. Однако на практике ограничения возникают уже при 22 ГГц, а гарантированной предельной частотой соединителя SMA следует считать 18 ГГц [46].

1. большая и все возрастающая потребность в соединителях SMA в связи с интенсивным развитием микроэлектроники СВЧ;

2. фирмы-производители соединителей, как правило, разрабатывают и выпускают разнообразные изделия микроэлектроники СВЧ. Естественно их стремление комплектовать эти изделия соединителями собственного производства. При его отсутствии они приобретают соединители только у хорошо известных и проверенных поставщиков, выпускающих продукцию в соответствии с военным стандартом.

Конструкция соединителей SMA вилки и розетки показана на рис. 6.1.

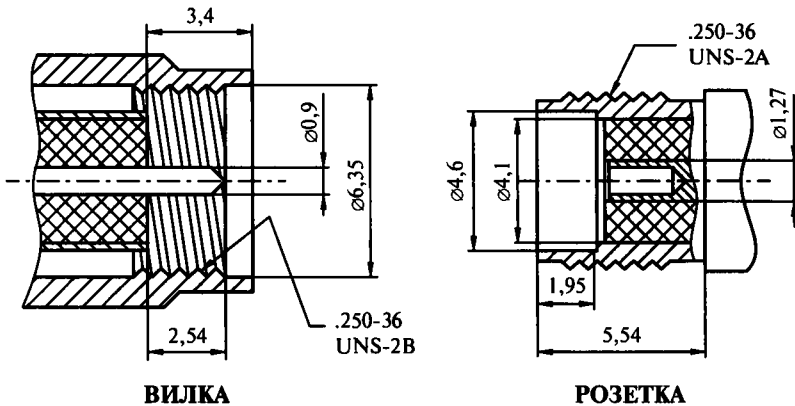


Рис. 6.1. Соединители SMA

Они представляют собой заполненную диэлектриком коаксиальную линию размерами 4,1/1,27 мм с волновым сопротивлением 50 Ом. В качестве диэлектрика использован фторопласт. Контакт по внутреннему проводнику происходит после введения штыря вилки в гнездо розетки, а по наружному проводнику – за счет резьбового соединения. Гнездовой контакт соединителя изготовлен из упрочненной бериллиевой бронзы и покрыт золотом толщиной 1,27 или 2,54 мкм по подслою никеля толщиной 2,54 мкм. Для изготовления корпуса соединителя SMA применяют нержавеющую сталь, покрытую золотом или с пассивированной поверхностью. В первом случае фирменное обозначение соединителя заканчивается цифрой 0, во втором – 1 или 2. Например, корпус соединителя 2052-0207-00 фирмы M/A-COM покрыт золотом, а у однотипного соединителя 2052-0207-02 – имеет пассивированную поверхность. Корпусы коммерческих соединителей изготавливают из латуни и покрывают никелем или золотом.

Соединители SMA имеют на корпусе дюймовую резьбу 0,250-36UNS-2A, близкую к метрической резьбе M6×0,75. В обозначении дюймовой резьбы: 0,250 – наружный диаметр резьбы с учетом припуска в дюймах (6,35 мм),

36 — число ниток резьбы на дюйм (что соответствует шагу резьбы 0,706 мм), UNS — тип резьбы и 2A — класс ее точности. Фактический наружный диаметр резьбы равен 6,18–6,22 мм, а не 6,35 мм. Изготавливать дюймовую резьбу необходимо в соответствии с американским стандартом на резьбы ANSI B1.1-1982, используя зарубежные метчики и плашки. Необходимы также проходной и непроходной калибры для контроля дюймовой резьбы. В изделиях СВЧ размеры резьбы на корпусе соединителя подлежат обязательной проверке.

При выборе зарубежного КМПП типа SMA необходимо учитывать тип ответного кабельного соединителя и марку используемого радиочастотного кабеля. В конечном итоге необходимо обеспечить приемлемые параметры согласования в системе радиочастотный кабель — кабельный соединитель — КМПП — МПЛ. Ограничивает параметры наиболее «слабое» звено в этой цепочке. Например, если выбраны соединитель SMA с предельной рабочей частотой 18 ГГц и радиочастотный кабель RG 58C/U с предельной частотой 5 ГГц, то при таком сочетании можно гарантировать высокий уровень параметров только на частотах до 5 ГГц.

При применении гибкого радиочастотного кабеля гарантированная предельная рабочая частота соединителей SMA — 12,4 ГГц. При рабочих частотах выше 12,4 ГГц следует применять только полужесткий кабель.

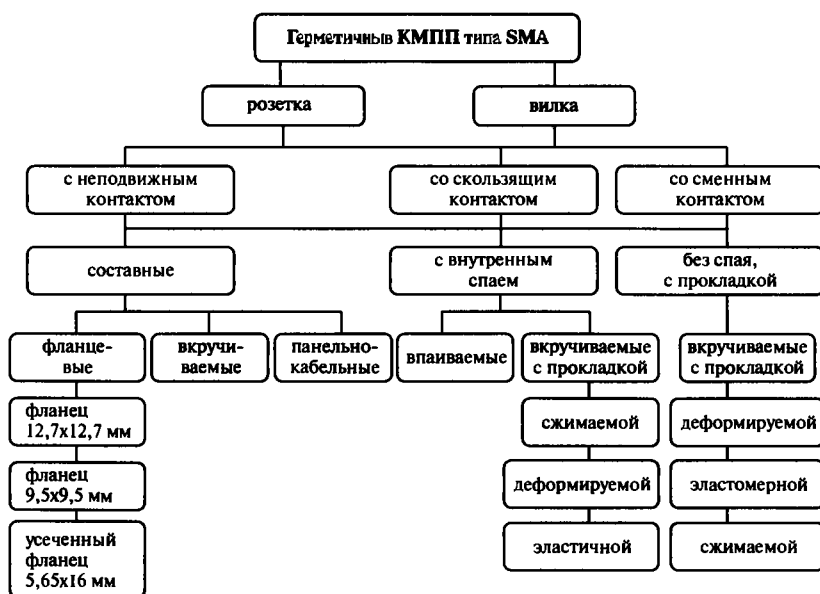


Рис. 6.2. Герметичные КМПП типа SMA фирмы Radiall

Каждый соединитель SMA имеет свое фирменное обозначение: R125.638.001 (Radiall), 22SMA-50-0-15/111NE (Huber + Shuner), PE 44026 (Pasternack) и т.д. Под ним скрываются конструктивные особенности соединителя: розетка или вилка, военного или гражданского назначения, прямой или угловой, фланцевый (с разными размерами и формой фланца), герметичный или негерметичный и т.д.

Зарубежные фирмы выпускают широкую номенклатуру соединителей SMA. Рассмотрим их на примере продукции французской фирмы Radiall [22, 48]. С 1952 года эта фирма ведет разработку и выпуск радиочастотных коаксиальных соединителей: розетка и вилка, разнообразные кабельные и приборно-кабельные соединители, кабельные сборки и адаптеры, коаксиально-микрополосковые переходы, выводы печатных плат, прямые и угловые, герметичные и негерметичные. Выпускаются соединители SMA гражданско-

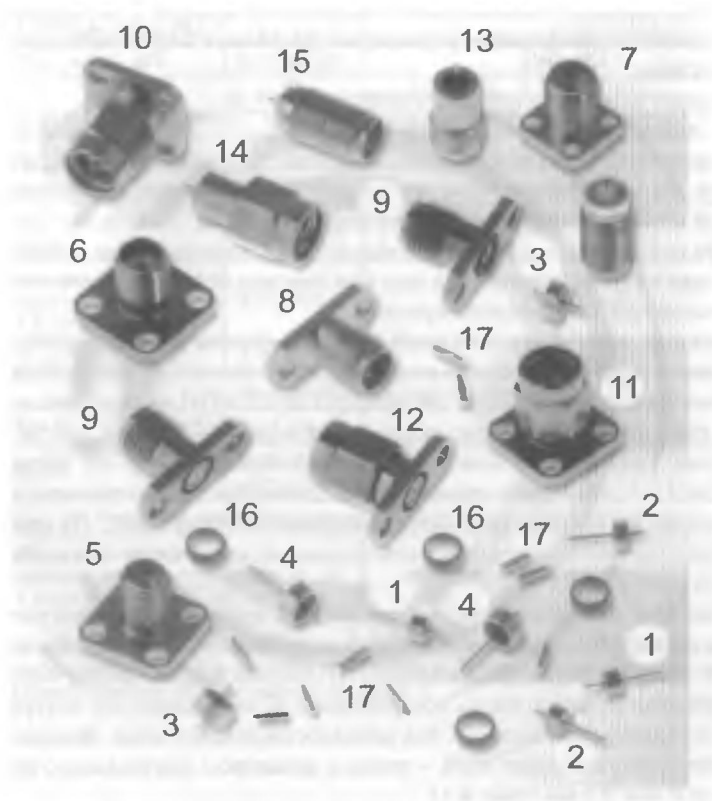


Рис. 6.3. Внешний вид соединителей SMA

го и военного назначения: более 100 типов кабельных и приборно-кабельных, около 80 типов КМПП и выводов печатных плат и более 20 типов одно-канальных адаптеров [48].

Особый интерес для современной герметизированной аппаратуры СВЧ представляют герметичные коаксиально-полосковые переходы SMA этой фирмы. Они имеют оригинальную конструкцию и отличаются высокой надежностью. Основные типы герметичных КМПП приведены на рисунке 6.2, а их внешний вид показан на рисунке 6.3.

Имеются 3 конструктивные решения герметичных КМПП:

1. «Составные»: собственно соединитель (СВЧ-разъем) в сочетании с 50-Омным металlostеклянным вводом. При этом центральный проводник СВЧ-ввода контактирует с внутренним гнездовым проводником соединителя:
  - фланцевые, с квадратным фланцем размерами  $12,7 \times 12,7$  или  $9,5 \times 9,5$  мм с 4 крепежными отверстиями, а также с усеченным прямоугольным фланцем размерами  $5,65 \times 16$  мм с 2 крепежными отверстиями;
  - вкручиваемые в корпус изделия;
  - прямые панельно-кабельные.
2. С внутренним металlostеклянным спаем, впайваемые в корпус изделия или вкручиваемые и герметизируемые в нем при помощи металлической или эластомерной (силиконовой) прокладки.
3. Без внутреннего металlostеклянного спая, вкручиваемые в корпус изделия и герметизируемые в нем при помощи деформируемой металлической или эластомерной прокладок.

Каждый из этих соединителей (за исключением панельно-кабельных) выпускается в варианте розетка или вилка, с неподвижным, скользящим или сменным контактами. Первые две конструкции КМПП имеют наиболее высокую степень герметичности: скорость натекания — менее  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ . При этом скорость натекания металlostеклянного ввода не превышает  $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ . Наименее герметичны соединители без внутреннего металlostеклянного спая: скорость натекания более  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ . Их применение ограничено изделиями менее ответственного назначения или кратковременного действия.

Способы уплотнения таких соединителей в корпусах изделий рассмотрены в работе [44]. В таблицах 6.1–6.3 приведены основные типы и фирменные обозначения герметичных КМПП фирмы Radiall. Radiall выпускает 46 модификаций герметичных соединителей: 27 составных, 14 с внутренним металlostеклянным спаем и 5 без металlostеклянного спая. Выпускаются также металlostеклянные СВЧ — вводы с диаметром центрального проводника 0,3; 0,46 и 0,5 мм (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Составные герметичные КМПП

№	Тип соединителя	Фирменное обозначение			
1	СВЧ-ввод	Диаметр/длина центрального проводника, мм			
		0,3/8,0	0,46/8,0	0,5/5,6	0,5/9,52
		R280.751.000 № 1	R280.755.000 № 2	R280.757.060 № 3	R280.757.080 № 4
I. Фланцевые, типов А и В, розетка					
2	Фланец 12,7×12,7 мм, тип А, № 5	R125.411.000	R125.411.010		
3	То же, тип В, № 6	R125.411.001	R125.411.011		
4	Фланец 9,5×9,5мм, тип А, № 7	R125.941.000	R125.941.010	-	-
5	Фланец усеченный, прямоугольный 5,65×16мм, тип А, № 8	R125.465.000	R125.465.010		
6	То же, тип В, № 9	R125.465.001	R125.465.011		
II. Фланцевые, типов А и В, вилка					
7	Фланец 12,7×12,7 мм, тип А, № 10	R125.431.000	R125.431.010		
8	То же, тип В, № 11	R125.431.001	R125.431.011		
9	Фланец 9,5×9,5 мм, тип А	R125.942.000	R125.942.010	-	-
10	Фланец усеченный, прямоугольный 5,5×16мм, тип А	R125.481.000	R125.481.010		
11	То же, тип В, № 12	R125.481.001	R125.481.011		
III. Вкручиваемые, проходные, розетка					
12	Тип А	R125.556.000	R125.556.010		
13	Тип В	R125.556.001 R125.638.001	R125.556.011 -		
IV. Фланцевые, панельно-кабельные (под полужесткий кабель RG 405/U)					
14	Фланец усеченный, прямоугольный 5,65×16 мм, тип А	R280.331.000	R280.331.010		

**Примечание.** В таблицах 6.1–6.3: тип А – соединители с золотым покрытием корпуса, тип В – соединители, корпус которых изготовлен из нержавеющей стали с пассивированной поверхностью. № 1–16 смотри на рис. 6.3.

Таблица 6.2. КМПП с внутренним металlostеклянным спаем

№	Тип соединителя	Фирменное обозначение	
		розетка	вилка
1	Впаиваемый, с круглым центральным контактом, тип А, № 13 и 14	R125 630 040 R125.630 170 R125.630 000	R125.633 040 R125 633 170 R125 633 000
2	Вкручиваемый, тип А, № 15. Герметизация в изделии при помощи сжимаемой металлической прокладки, № 16	R125 609 000	R125.639 000
3	То же, тип В	R125 609.001	R125.639.001
4	Вкручиваемый, со сменным круглым скользящим центральным контактом, № 17, тип А	R125 609 010	-
5	То же, тип В	R125.609 011	-
6	Вкручиваемый, со сменным плоским центральным контактом, тип А	R125 609 070	-
7	То же, тип В	R125 609 071	-

Таблица 6.3. Вкручиваемые КМПП без металlostеклянного спаея, тип В

№	Тип соединителя	Фирменное обозначение	
		розетка	вилка
1	Герметизируемый в корпусе изделия при помощи деформируемой металлической прокладки	R125.605 401	-
2	То же, с круглым сменным скользящим центральным контактом	R125 605 371	-
3	Соединитель по п 1, с плоским сменным скользящим центральным контактом	R125 605.361	-
4	С плоским сменным центральным контактом, герметизируемый в корпусе при помощи эластомерной прокладки	R125 605.561	R125 635.561

### Параметры КМПП типа SMA

#### Электрические характеристики

Волновое сопротивление, Ом..... 50  
 Рабочий диапазон частот, ГГц .. 0—18  
 КСВН в рабочем диапазоне частот для соединителей:  
     составных, .....  $1,06+0,002f_{\text{ГГц}}$   
     с внутренним металlostеклянным спаем. ....  $1,10+0,01f_{\text{ГГц}}$   
 Прямые СВЧ потери, дБ.....  $0,07\sqrt{f_{\text{ГГц}}}$   
 Экранное затухание, дБ, менее ..... -60  
 Максимальное эффективное напряжение, В ..... 500  
 Сопротивление изоляции, Ом, более .....  $5 \cdot 10^9$   
 Рабочий диапазон температур, °С, для соединителей:  
     составных, ..... -65 + 165  
     герметизируемых прокладками ..... -40 ..+ 100

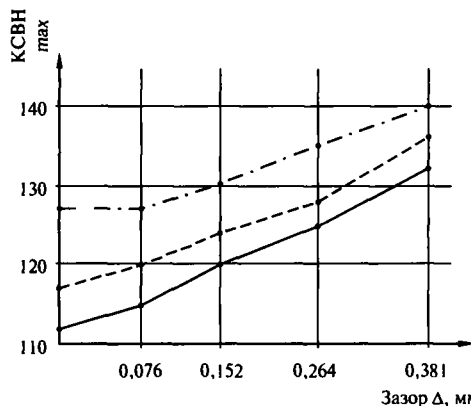
**Механические характеристики**

Количество циклов соединений и разъединений.....	500
Усилие соединения и разъединения, Н.....	27
Момент вращения гайки, Н·см.....	2,8
Момент вращения при вкручивании соединителя в корпус изделия, Н·см.....	280±10 или 190±10

Нередко считают (и указывают это в конструкторской документации), что соединители SMA с коаксиальной линией размерами 4,1/1,27 мм, заполненной фторопластом, являются соединителями 3,5/1,52 мм и ошибочно называют последние SMA. На самом деле это другой класс соединителей — 3,5 мм — соединители с воздушной коаксиальной линией, имеющие предельную рабочую частоту 34, а не 18 ГГц.

Заметим также, что некоторые фирмы иногда присваивают название SMA с добавлением размера коаксиальной линии своим новым разработкам. Так поступила, например, фирма Radiall, назвав SMA-2,9 разработанный ею 2,92-мм соединитель с предельной рабочей частотой 40 ГГц [55]. Но это скорее исключение из правил.

Соединители SMA не являются прецизионными для измерительной и метрологической аппаратуры СВЧ. Прецизионными считаются только соединители с воздушной коаксиальной линией, например APC-7, RPC-7, APC-3,5, RPC-3,5, APC-2,4 и др. Наличие фторопластового изолятора, подверженного старению и деформации, и несовершенство области сочленения (reference plane) пары соединителей SMA вилка и розетка не позволяют обеспечить низкий уровень КСВН и его стабильность и воспроизводимость. Оптимальным считается такое соединение пары, при котором штырь входит в



**Рис. 6.4.** Зависимость максимального КСВН пары соединителей SMA от величины зазора  $\Delta$ : 1)  $\Delta_2 = 0$  мм, 2)  $\Delta_2 = 0,152$  мм, 3)  $\Delta_2 = 0,24$  мм



гнездо без зазора, а зазор между фторопластовыми изоляторами также равен нулю [56]. Результаты экспериментального исследования влияния зазоров между штырем и гнездом ( $\Delta_1$ ) и между изоляторами ( $\Delta_2$ ) розетки и вилки на величину максимального КСВН в диапазоне частот 2–26 ГГц пары соединителей SMA показаны на рисунке 6.4 [56].

Эти зависимости интерпретируются следующими эмпирическими формулами:

$$\text{КСВН}_{\text{макс}} = 1,10 + 0,57 \cdot \Delta_1, \text{ при } \Delta_2 = 0 \text{ мм};$$

$$\text{КСВН}_{\text{макс}} = 1,15 + 0,54 \cdot \Delta_1, \text{ при } \Delta_2 = 0,076 \text{ мм};$$

$$\text{КСВН}_{\text{макс}} = 1,25 + 0,41 \cdot \Delta_1, \text{ при } \Delta_2 = 0,152 \text{ мм}.$$

К тому же в области соединения гнезда и штыря происходит некоторое увеличение волнового сопротивления на длине ламелей. Такое увеличение несущественно для соединителей общего назначения, но с ним следует считаться в случае измерительных соединителей.

## 6.2. Соединители SMC

Соединители SMC (Subminiature Grade C) были разработаны для устройств с высокой плотностью монтажа компонентов, подверженных воздействию вибрационных и ударных нагрузок. Эти соединители являются более миниатюрными аналогами базового соединителя SMA. При создании соединителей SMC были использованы многие конструктивные решения, примененные в соединителях SMA:

- гнездовой и штыревой контакты внутренних проводников соответственно розетки и вилки,
- резьбовое соединение наружных проводников,
- коаксиальная линия с фторопластовым диэлектриком.

Область соединения розетки и вилки показана на рисунке 6.5. Соединители имеют коаксиальную линию с размерами 3/0,94 мм, заполненную фторопластом. Корпус соединителя изготавливают из латуни и покрывают золотом толщиной 2,54 мкм или никелем. Резьба на корпусе розетки — 0,190-32-UNF-2A, приблизительно эквивалентна метрической резьбе M5×0,8. Гнездовой контакт изготавливают из упрочненной бериллиевой бронзы, штыревой контакт — из латуни. Покрытие контактов — износостойкое золото. Разработаны следующие модификации соединителей SMC розетка и вилка: кабельные для заделки гибкого кабеля обжимом с деформацией и прижимом, фланцевые панельные и проходные, выводы энергии, адаптеры одноканальные и для каналов разных сечений. Кабельные соединители SMC работают только с гибким кабелем марок RG 174, 179, 187, 188, 316.

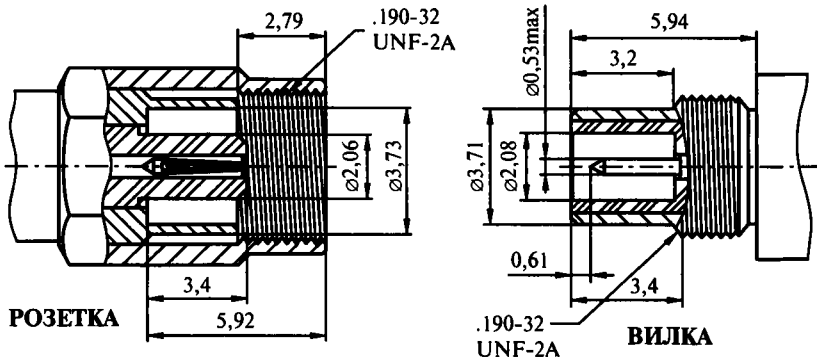


Рис. 6.5. Соединитель SMC

**Параметры соединителя SMC**

Волновое сопротивление, Ом	50
Рабочий диапазон частот, ГГц	0–10
КСВн	$1,15 + 0,04 f_{\text{ГГц}}$ (прямой соединитель)
	$1,25 + 0,04 f_{\text{ГГц}}$ (угловой соединитель)
Прямые потери СВЧ, дБ	0,25 (прямой соединитель)
	0,50 (угловой соединитель)
Экранное затухание, дБ,	
на частотах 2–3 ГГц	–60
Рабочее напряжение, В	335
Рабочий диапазон температур, °С	–65 ... +165
Количество циклов соединениерассоединение	
(при максимальной скорости 12 циклов в минуту)	500

Благодаря миниатюрности, способности работать при воздействии вибрационных нагрузок и низкой стоимости (приблизительно вдвое меньшей стоимости соединителей SMA) соединители SMC нашли применение в системах телекоммуникации, беспроводной связи и в измерительной аппаратуре.

Однако соединители SMC не обеспечивают возможность быстрого соединения и разъединения, а их параметры не всегда приемлемы: максимальный КСВН в диапазоне частот до 10 ГГц – более 1,6.

Соединители SMC выпускают многие зарубежные фирмы M/A – COM [18, 42], Amphenol [52], Tyco (AMP) [49], KMW [54], Radiall [55] и др.

**6.3. Соединители N**

Соединитель N, названный в честь его изобретателя Пола Нейла из американской фирмы Bell Labs, был первым коаксиальным соединителем для при-

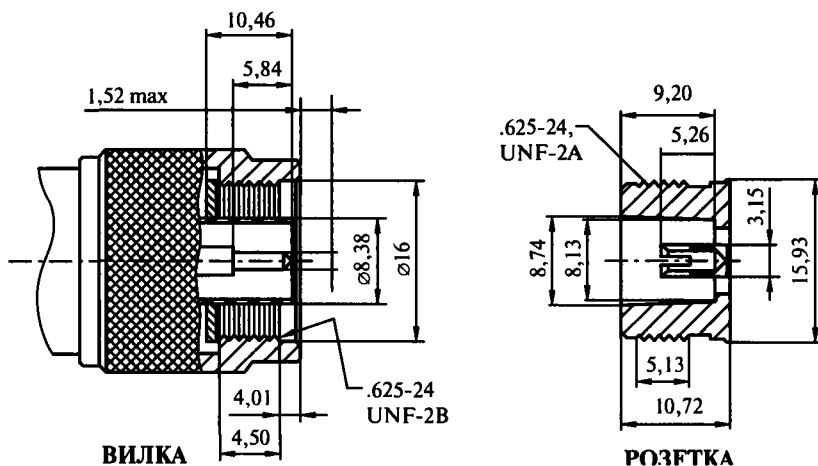


Рис. 6.6. Соединитель N

менения в устройствах СВЧ [43]. Он содержит коаксиальную линию размерами 7/3,04 мм.

Конструкция области соединения розетки и вилки показана на рис. 6.6. Контакт по внутренним проводникам происходит после введения штыря вилки в гнездо розетки, а по наружным — резьбовым соединением. Для этого корпус розетки выполнен с дюймовой резьбой 0,625-24UNEF-2A (приблизительно эквивалентна метрической резьбе M16×1). Корпус соединителя изготавливают из пассивированной нержавеющей стали, а также из бериллиевой бронзы или латуни и покрывают золотом, никелем, серебром или специальными сплавами: «белая бронза», Optalloy, Sucoplate и др. Внутренний проводник изготавливают из упрочненной бериллиевой бронзы и покрывают износостойким золотом. Материалом диэлектрика коаксиальной линии является фторопласт.

Зарубежные фирмы выпускают серию соединителей N, включающую розетку и вилку, прямые и угловые, кабельные, приборно-кабельные, проходные, выводы энергии, КМПП и адаптеры. Выпускаются соединители коммерческие и военного назначения (соответствуют стандарту MIL-C-39012, класс II, категория B). Сведения о герметичных соединителях N в известных автору рекламных материалах зарубежных фирм не приводятся.

#### Параметры соединителя N

Волновое сопротивление, Ом	50
Рабочий диапазон частот, ГГц	0—11
Максимальный КСВН	1,3 (прямой соединитель) 1,5 (угловой соединитель)

Прямые потери СВЧ, дБ, на частотах от 2 до 3 ГГц .....	0,15 (прямой соединитель) 0,30 (угловой соединитель)
Экранное затухание, дБ, на частотах от 2 до 3 ГГц .....	-90
Рабочее напряжение, В .....	1000
Сопротивление изоляции, МОм .....	5000
Средняя допустимая мощность, Вт .....	2000 (0,1); 600 (1); 150 (10)
при температуре 25°C (на частотах, ГГц) .....	
Диапазон рабочих температур, °C . . . . .	- 65... +165
Гарантированное количество циклов соединение-рассоединение .....	500

Соединитель N может применяться со многими типами гибких кабелей, а также с полужесткими кабелями RG 402 и RG 405. Заделку гибкого кабеля в соединитель производят обжимом с деформацией, а полужесткого кабеля — пайкой или прижимом.

Ряд фирм (Amphenol, Rosenberger, Radiall и др.) выпускают прецизионные соединители N с предельной частотой 18 ГГц. Такие соединители имеют воздушную коаксиальную линию размерами 7/3,04 мм. Внутренний проводник закреплен в опорной диэлектрической шайбе. Соединители изготавливают из немагнитных материалов, покрытия поверхностей (серебро, «белая бронза») также немагнитные. Кабельные соединители используют в комплекте с полужесткими кабелями 0,085, 0,141 и 0,250 дюйма.

Еще в 60-х годах прошлого века фирма Amphenol [52] разработала прецизионный униполярный соединитель APC-7 с предельной рабочей частотой 18 ГГц и величиной потерь СВЧ менее 0,03 дБ. Он имеет большой срок службы без износа и разрушения контактов и высокую надежность. Благодаря таким параметрам этот соединитель нашел широкое применение в различной радиоизмерительной аппаратуре. Для сочетания с соединителем APC-7 фирма Amphenol разработала серию адаптеров с коаксиальными каналами разных размеров.

Фирма Rosenberger выпускает униполярные соединители RPC-7 с улучшенными параметрами: КСВН менее 1,05, прямые потери СВЧ менее  $0,07\sqrt{f_{\text{ГГц}}}$  в диапазоне частот 0—18 ГГц [57].

Аналогичный 7-мм соединитель для применения в метрологической аппаратуре выпускает фирма M/A-COM [18, 42]. В нем применены униполярные контакты внутренних проводников и резьбовое соединение наружных проводников розетки и вилки. В диапазоне частот до 18 ГГц КСВН соединителя равен  $1,003 + 0,002 f_{\text{ГГц}}$ . Максимальный КСВН соединителя не превышает 1,05. Разработаны кабельные и панельные соединители, а также адаптеры. Они предназначены для работы с полужестким кабелем 0,085, 0,141 и 0,325 дюйма, а также с гибким кабелем RG 214 и RG 142.

Фирма Radiall [55] производит более 75 модификаций соединителей N с КСВН, равным  $1,05 + 0,007 f_{\text{ГГц}}$  и потерями СВЧ не более  $0,1\sqrt{f_{\text{ГГц}}}$  во всем рабочем диапазоне частот.

Наряду с соединителями SMA соединители N являются наиболее применяемыми радиочастотными соединителями. Благодаря хорошим электрическим параметрам, способности выдерживать большие механические нагрузки (вследствие жесткости конструкции) и сравнительно низкой стоимости соединители N нашли широкое применение при создании антенных устройств, радаров, систем телекоммуникаций, СВЧ-устройств (фильтров, передатчиков и др.), радиоизмерительной аппаратуры.

Соединители N выпускают те же зарубежные фирмы, которые выпускают и соединители SMA.

### 6.4. 3,5-мм соединители

Первым шагом в продвижении ко все большим предельным частотам было создание соединителей с воздушной коаксиальной линией размерами 3,5/1,52 мм — 3,5-мм соединителей. За основу был принят базовый соединитель SMA с коаксиальной линией размерами 4,1/1,27 мм, заполненной фторопластом. Из нее удалили фторопластовый изолятор, заменив его воздухом. Для сохранения волнового сопротивления равным 50 Ом размеры коаксиальной линии были уменьшены в 1,2 раза. Крепление внутреннего проводника и герметизация соединителя были осуществлены при помощи опорной диэлектрической шайбы. Конструирование такой шайбы, вносящей минимальную неоднородность в коаксиальную линию, является одной из важнейших задач при создании широкополосных и сверхширокополосных соединителей.

Первым в классе 3,5-мм соединителей стал соединитель APC-3,5, разработанный в 1976 году фирмой Amphenol (рис. 6.7) [56, 58–60].

Теоретическая предельная частота воздушной коаксиальной линии 3,5/1,52 мм равна 38,8 ГГц. Обследование соединителя APC-3,5, проведенное фирмой Hewlett-Packard, показало возможность его применения на

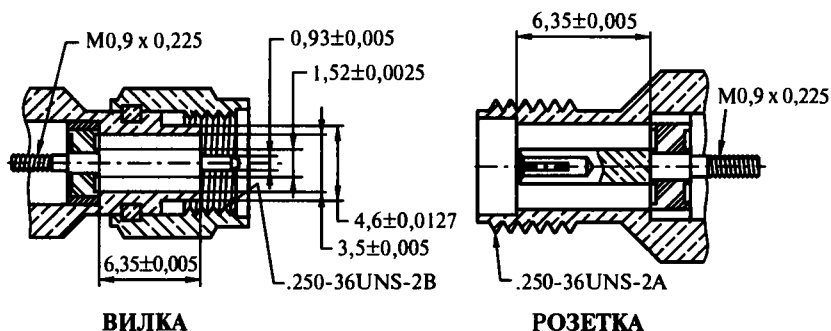


Рис. 6.7. Соединитель APC-3,5 вилка и розетка

частотах до 34 ГГц. Кабельные соединители и адаптеры APC-3,5 предназначены для работы с полужестким кабелем марок RG 405/U и RG 402/U и выпускаются в вариантах розетка и вилка. Фирма Maury Microwave выпускает также коаксиально-микрополосковые переходы для изделий микроэлектроники [47]. Соединитель APC-3,5 полностью совместим с базовым соединителем SMA. При этом параметры пары соединителей APC-3,5 и SMA существенно лучше, чем у пары соединителей SMA, особенно в области высоких частот. По сравнению с соединителем SMA соединитель APC-3,5 имеет лучшую воспроизводимость электрических параметров и более высокую надежность.

#### Основные параметры соединителя APC-3,5

Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0–34
КСВН в рабочем диапазоне частот (на пару соединителей) . . . . .	$1,01 + 0,004 f_{\text{ГГц}}$
Максимальный КСВН .....	1,15
Высокочастотные потери, дБ .....	0,09
Экранное затухание, дБ (на частоте 16 ГГц) .....	-90
Гарантированное количество соединений и рассоединений без ухудшения электрических параметров и механических повреждений .....	1000

Соединители APC-3,5 выпускают Amphenol Products [58], Maury Microwave [46], Rosenberger [57] и некоторые другие фирмы для применения в специальной радиоизмерительной аппаратуре СВЧ с повышенными требованиями к прецизионности измерений и надежности.

## МИНИАТЮРНЫЕ, МИКРОМИНИАТЮРНЫЕ И УЛЬТРАМИНИАТЮРНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

### 7.1. Назначение соединителей

Важнейшие направления развития СВЧ-микроэлектроники нового поколения — микроминиатюризация, повышение надежности и внедрение высокотехнологичных процессов производства. Это обусловлено все большим применением изделий микроэлектроники в быстро развивающихся системах мобильной и беспроводной связи и телекоммуникаций, компьютерах и периферийных устройствах, военных и аэрокосмических системах, измерительной и медицинской технике. Особенность таких систем — высокая плотность монтажа и необходимость быстрого соединения и рассоединения.

При создании этих систем в настоящее время широко применяют высокопроизводительную технику поверхностного монтажа, обеспечивающую групповые методы автоматизированной сборки и пайки (ИК-оплавление, конвекционная пайка, пайка в паровой фазе, двойной волной и др.). Однако для использования поверхностного монтажа необходимы соответствующие радиокомпоненты. В нашей стране эта техника пока еще не получила должного распространения, в том числе и из-за отсутствия промышленно выпускаемых соединителей для ввода и вывода СВЧ-сигналов и для межплатных соединений. Поэтому все большее внимание отечественных разработчиков привлекают импортные соединители. К тому же если разрабатываемая продукция предназначена на экспорт, заграничный заказчик требует применения исключительно импортных соединителей.

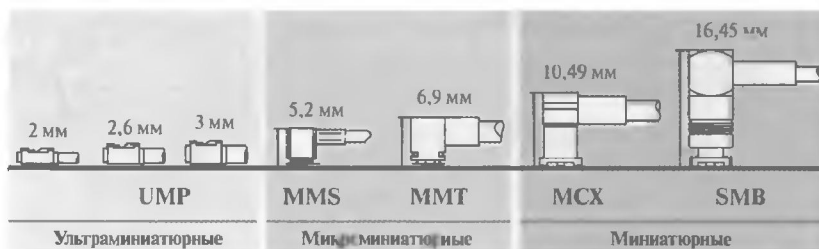


Рис. 7.1. Соединители фирмы Radiall

Рынок таких соединителей достаточно обширен. Их выпускают фирмы Amphenol [58], M/A-COM [42], Huber + Shuner [29], Radiall [55] и др. Среди всех фирм выделяется Radiall – мировой лидер в производстве миниатюрных, микроминиатюрных и ультраминиатюрных SMT-соединителей для поверхностного монтажа (Surface-Mount Technology) (рис. 7.1) [55, 61].

## 7.2. Миниатюрные соединители

При их разработке был отвергнут традиционный опыт конструирования проходных коаксиальных соединителей, монтируемых в стенку корпуса изделия, так как подобная конструкция несовместима с автоматизированной технологией посадки компонентов и не обеспечивает существенного увеличения производительности сборки и снижения стоимости изделий.

Точкой отсчета можно считать соединители серии SMB, которые выпускаются многими известными фирмами: M/A-COM, Amphenol, AMP, Molex, Radiall и др.

### 7.2.1. Соединители SMB

Соединители SMB (Subminiature Grade B) до сих пор широко применяются в аппаратуре с высокой плотностью монтажа, в тех случаях, когда необходимо быстро выполнять соединение и рассоединение. Они предназначены для применения в устройствах с ограниченными размерами рабочего пространства, работающих в частотном диапазоне до 4 ГГц. Потребность в соединителях SMB вызвана развитием сотовой связи, систем беспроводной связи и телекоммуникаций, в том числе и военного назначения.

Соединитель SMB представляет собой заполненную диэлектриком коаксиальную линию с размерами 3/0,94 мм с волновым сопротивлением 50 Ом. В качестве диэлектрика использован фторопласт. Соединение пары розетка – вилка фиксируется защелкиванием. Основные технические характеристики соединителей SMB приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Параметры миниатюрных соединителей

Параметр	SMB	MCX
Волновое сопротивление, Ом	50 или 75	50 или 75
Предельная рабочая частота, ГГц	4	6
Максимальный КСВН (на частотах, ГГц)	1,11 (1) 1,22 (2,5) 1,35 (4)	1,06 (1) 1,09 (2,5) 1,13 (6)
Прямые потери, дБ (на частоте, ГГц)	0,25	0,15 (2)
Экранное затухание, дБ (на частотах, ГГц)	-55 (2-3)	-55 (2)



Таблица 7.1. (окончание)

Параметр	SMB	MCX
Рабочее напряжение, В	250	170-335
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	1000	1000
Усилие соединения и разъединения, Н	64	64
Допустимое количество соединений и разъединений	500	500
Диапазон рабочих температур, °С	-65...165	-55...155

**Примечание.** В этой и последующих таблицах приведены типичные величины КСВН, прямых потерь и рабочего напряжения соединителей с волновым сопротивлением 50 Ом. Конкретные значения зависят от конструкции соединителя и типа применяемого кабеля.

Конструкция области соединения вилки и розетки показана на рисунке 7.2

Разработаны соединители с волновым сопротивлением 50 и 75 Ом. Выпускаются прямые и угловые соединители вилка кабельная и розетка для пе-

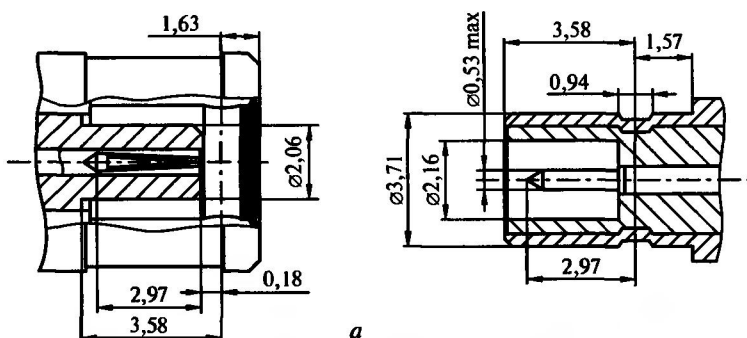


Рис. 7.2. Конструкция (а) и внешний вид (б) соединителей SMB

чатных плат, проходные соединители розетка, кабельные сборки и адаптеры. Корпусы соединителей изготавливают из латуни и покрывают золотом толщиной 2,5 мкм.

Соединители SMB предназначены для работы с гибкими радиочастотными кабелями RG174/U, RG178/U, RG188/U, RG174/U, RG196/U или их аналогами серии SHF (выпускаются фирмой Radiall). Недостатками этих соединителей являются большая высота области соединения (высота пары «SMB—вывод энергии» и «SMB—коаксиальный соединитель» в сборе 16,45 мм – см. рис. 7.1) и низкая предельная рабочая частота. Для устранения этих недостатков была создана серия соединителей MCX.

### 7.2.2. Соединители MCX

Соединители MCX розетка и вилка (рис. 7.3) разработаны для миниатюризации устройств и снижения стоимости их монтажа.



Рис. 7.3. Соединители MCX

Их применение позволяет использовать технологию поверхностного монтажа и оптимизировать конструкцию печатной платы. Они более миниатюрны (приблизительно на 30%) и имеют предельную частоту 6 (а не 4 ГГц) по сравнению с соединителями SMB, хотя в обоих соединителях использована одинаковая коаксиальная линия. Соединители MCX компактны, имеют достаточно простую конструкцию и высокую надежность. Соединение розетки и вилки фиксируется защелкиванием специального выступа на корпусе вилки в проточке на корпусе розетки. Заделка радиочастотного кабеля в соединители производится методом обжима или обжима и пайки. Применяемые кабели – RG196/U, RG188/U, RG405/U и 0,047 дюйма. Корпус и центральный проводник соединителя вилки изготовлены из латуни и покрыты золотом или никелем. Гнездовой контакт соединителя розетка изготовлен из бериллиевой бронзы и покрыт золотом. Основные параметры соединителей MCX приведены в таблице 7.1.

Зарубежные фирмы выпускают широкий спектр соединителей МСХ: кабельные розетка и вилка с волновым сопротивлением 50 и 75 Ом под заделку гибкого или полужесткого кабеля (обжимом или пайкой), прямые, угловые и панельные, выводы энергии для установки на печатные платы прессовой посадкой или пайкой, а также адаптеры.

Для каждого из этих соединителей (с учетом применяемого типа кабеля) фирмы дают подробные рекомендации по установке в изделия: установочные размеры панели, конфигурацию и размеры контактных площадок на плате, температурный режим пайки (обычно припоем Sn63–Pb35–Ag2 с температурой пайки 210–230°С).

Соединители МСХ нашли применение в устройствах беспроводной связи, радио и телекоммуникационных системах военного и гражданского назначения, системах телевидения.

### 7.3. Микроминиатюрные соединители

Следующим шагом на пути миниатюризации стало создание серии микроминиатюрных соединителей типов ММТ, ММС, ММВХ, ММСХ.

#### 7.3.1. Соединители ММТ

Эти соединители были разработаны для обеспечения полной совместимости с технологией поверхностного монтажа активных и пассивных компонентов на печатные платы. Вывод энергии вилка устанавливается на плату и соединяется с коаксиальным разъемом розетка (рис. 7.4).

Соединение фиксируется защелкиванием. При этом возможен поворот разъема с заделанным в него кабелем на 360°. Параметры соединителей ММТ представлены в таблице 7.2.



Рис. 7.4. Соединители ММТ

Таблица 7.2. Параметры микроминиатюрных соединителей

Параметр	MMT		MMS		MMBX	MMCX
Волновое сопротивление, Ом	50	75	50	75	50	50
Предельная рабочая частота, ГГц	8	1	6	1	12,4	6
Волновое сопротивление, Ом	50	75	50	75	50	50
Предельная рабочая частота, ГГц	8	1	6	1	12,4	6
Максимальный КСВН (на частотах, ГГц)	1,05 (1) 1,10 (2,5) 1,15 (6)		1,05 (1) 1,15 (2,5) 1,35 (6)		1,20	1,07 (1 ГГц) 1,12 (2,5 ГГц) 1,25 (6 ГГц)
Прямые потери, дБ (на частотах, ГГц)	0,2 $\sqrt{f_{ГГц}}$		0,2 (2)		—	—
Экранное затухание, дБ (на частотах, ГГц)	-30 (3)		-40 (2)		—	-60
Рабочее напряжение, В	170		50		170...335	170
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	5000		1000		1000	1000
Усилие соединения и разъединения, Н	7–18		5,5–7		8–30	6–15,5
Допустимое количество соединений и разъединений	500		50		100	500
Диапазон рабочих температур, °С	-55.. 100		-40...90		-55...155	-55...155

Соединители MMT нашли применение в конструкциях носимых радиостанций, мобильных и микротелефонов, в системах телекоммуникаций, беспроводной и спутниковой связи. Выводы энергии MMT поставляются в специальной антистатической таре партиями 100, 500 и 3000 шт.

Дальнейшая миниатюризация соединителей была продолжена, созданием соединителей MMS.

### 7.3.2. Соединители MMS

Соединители MMS (рис. 7.5) являются более миниатюрными аналогами соединителей MMT.

Высота в сборе пары «MMS–вывод энергии» и «MMS–кабельный соединитель» – 5,2 мм (против 6,9 мм для соединителей MMT – см. рис. 7.1). Однако они проигрывают соединителям MMT по широкополосности, до-



Рис. 7.5. Соединители MMS

пустимому количеству соединений и разъединений, величине рабочего напряжения и диапазону рабочих температур (см. табл. 7.2).

Вывод энергии MMS-розетка устанавливается на плате на трех гибких выводах, обеспечивающих его устойчивость во время автоматизированной операции посадки на контактные площадки (размером 1,2×1,5 мм) платы. Коаксиальный соединитель MMS-вилка фиксируется защелкиванием и после соединения может поворачиваться вместе с заделанным в него кабелем на 360°.

Область применения соединителей MMS та же, что и у рассмотренных выше соединителей SMB, MCX и MMT.

Разработана и выпускается широкая номенклатура соединителей MMS: выводы энергии для поверхностного монтажа, прямые и угловые кабельные сборки с коаксиальными соединителями для установки на плату запрессовкой и широкий ассортимент кабельных сборок с адаптерами для обеспечения совместимости практически со всеми выпускаемыми типами соединителей. Соединители MMS работают с радиочастотными кабелями диаметром 1 и 2 мм. Выводы энергии MMS поставляются в полиэстеровой упаковке партиями 100, 500 и 3000 шт.

### 7.3.3. Соединители MMBX

Новая серия соединителей MMBX (рис. 7.6) была разработана для межплатных соединений в телекоммуникационных системах II и III поколений (GSM, WCDMA и др.).

Основное достоинство этих соединителей — миниатюрность и возможность быстрого соединения и разъединения плат. Для соединения двух плат используют два одинаковых соединителя (разъема) розетка и промежуточный адаптер. Адаптер обеспечивает фиксацию соединения с одной из розе-



Рис. 7.6. Соединители MMBX

ток и простое соединение со второй розеткой. При расстыковке адаптер остается на одной из соединяемых печатных плат. Розетка и адаптер имеют шаровую шарнирную конструкцию, обеспечивающую надежное соединение плат даже при их аксиальной несоосности до 0,6 мм и радиальной несоосности до 0,4 мм при межплатном расстоянии 7 мм и компенсацию сдвигающих усилий, создаваемых другими компонентами, размещенными на плате.

Разработана серия прямых и угловых соединителей MMBX вилка и розетка для поверхностного и штырькового монтажа, концевые розетки для соединения печатных плат, с промежуточными адаптерами и адаптерами для выхода на базовые соединители SMA. Благодаря столь широкому спектру конструктивных вариантов соединители MMBX применяют не только для межплатных соединений, но и для соединения материнских плат со вспомогательными платами, а также для вывода сигнала на радиочастотный кабель. MMBX розетка и адаптер могут поставляться как в сборе (промежуточный адаптер вставлен в розетку), так и по отдельности.

Микроминиатюрные коаксиальные соединители серии MMBX рассчитаны на волновое сопротивление 50 Ом и рабочий диапазон частот до 6 ГГц. Их основные характеристики приведены в таблице 7.2.

#### 7.3.4. Соединители MMCX

Соединители MMCX применяют в устройствах микроэлектроники с плотной компоновкой компонентов, когда требуется быстрое соединение обеих частей соединителя — розетки и вилки. Они являются одними из самых миниатюрных из всех известных коаксиальных радиочастотных соединителей. Соединители MMCX (рис. 7.7) имеют типовую конструкцию: традиционные гнездовой и штыревой контакты центрального проводника и соединя-



Рис. 7.7. Соединители MMCX

емые защелкиванием наружные проводники, разделенные фторопластовым изолятором.

При этом наружный проводник соединителя вилка выполнен гладким, без продольных разрезов. Разработан полный спектр этих соединителей: кабельные (под заделку радиочастотного кабеля обжимом или пайкой), выводы энергии розетка и вилка, различные кабельные сборки и адаптеры. Основные технические характеристики соединителей MMCX приведены в таблице 7.2.

## 7.4. Ультраминиатюрные соединители

Пионером в создании ультраминиатюрных соединителей серии MMP (Micro Miniature Pressure Contact) является фирма Radiall. В полный набор соединителей MMP входит серия межплатных соединителей IMP (Interconnected Micro Miniature Pressure Contact) и серия соединителей UMP (Ultra Miniature Pressure Contact) для вывода сигналов с платы на радиочастотный кабель.

### 7.4.1. Соединители IMP

Соединители IMP (рис. 7.8) предназначены для замены двух коаксиальных соединителей (SMT-выводов энергии розетка и вилка) или даже трех соединителей (двух SMT-выводов и соединяющего их адаптера).

В основе их конструкции лежит оригинальный прессовый контакт. Металлические детали соединителя изготовлены из бериллиевой бронзы и покрыты золотом. Для установки на печатную плату требуется всего 22,2 мм<sup>2</sup> площади (5,7×3,9 мм), при этом расстояние между платами 2,5–3 мм, а по специальному заказу — даже 2 мм. По желанию заказчика могут быть изготовлены соединители для плат с расстоянием между ними 8,2 и 12,6 мм.



Рис. 7.8. Соединители IMP

Соединитель с тремя гибкими выводами припаивают к контактным площадкам (размером  $2 \times 1,5$  мм) платы припойной пастой Sn63—Pb35—Ag2. В новой IMP-версии возможно соединение плат (межплатное расстояние — 3 мм) при их осевой несоосности до 0,4 мм. Соединители IMP имеют простую и надежную конструкцию, их вес не превышает 0,02 г. Они обеспечивают надежное соединение при низкой стоимости. Предельная рабочая частота соединителей — 6 ГГц (табл. 7.3).

Таблица 7.3. Параметры ультрамикроминиатюрных соединителей

Параметры соединителей	IMP	UMP
Волновое сопротивление, Ом	50	50
Предельная рабочая частота, ГГц	6	6
КСВН	$1,1 + 0,03 \cdot f_{\text{ГГц}}$	$1,05 + 0,03 \cdot f_{\text{ГГц}}$
Прямые потери, дБ, макс.	$0,2 \sqrt{f_{\text{ГГц}}}$	$0,2 \sqrt{f_{\text{ГГц}}}$
Экранное затухание, дБ (на частоте, ГГц)	—	-40 (2)
Рабочее напряжение, В	100	100
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	3000	1000
Усилие соединения и разъединения, Н	—	5
Допустимое количество соединений и разъединений	20	100 (блокировка) 3000 (защелкивание) 10000 (скользящий контакт)
Диапазон рабочих температур, °С	-40...90	-40...90

Их применяют в различных системах беспроводной связи, включая мобильные телефоны с частотами 900 и 1900 МГц. Соединители IMP четырех модификаций поставляют партиями от 100 до 2500 шт. Фирма Radiall продолжает совершенствовать соединители IMP с целью достижения предельной рабочей частоты 18 ГГц.



### 7.4.2. Соединители UMP

Большой интерес представляют ультраминиатюрные соединители UMP с прессовым контактом (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Соединители UMP

Они имеют приемлемые электрические параметры (см. табл. 7.3) при рекордно малых размерах: высота соединения — от 2 до 3 мм. Соединители UMP идеально подходят для изделий микроэлектроники с высокой плотностью монтажа, работающих в частотном диапазоне до 6 ГГц. Вывод энергии UMP занимает при установке на плату всего 15,8 мм<sup>2</sup> площади (4,4×3,6 мм), его вес — 0,03 г (вес коаксиального вывода UMP вилка — 0,08 г). Применение соединителей UMP экономически выгодно — один такой соединитель заменяет два коаксиальных соединителя: SMT-вывод и коаксиальный разъем (вилку). Соединение может осуществляться одним из трех способов:

- Со скользящим контактом (применяется, как правило, в измерительных устройствах);
- Зашелкиванием. Способ не требует специального инструмента для рассоединения и прост в обслуживании;
- Блокировкой. Используется при работе соединителей в условиях жестких вибраций. Для рассоединения требуется специальный инструмент.

Корпуса выводов UMP изготовлены из бериллиевой бронзы, а соединителей вилка — из латуни, и покрыты золотом. Разработаны 3 модификации UMP-выводов энергии и 4 модификации соединителей вилка для разных типов соединения, а также 15 модификаций кабельных сборок для различных типов кабелей и способов соединения с выходным соединителем типа SMA и без него. Соединители поставляют в антистатической упаковке партиями от 100 до 4000 шт.

## СОЕДИНИТЕЛИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

### 8.1. 2,9-мм соединители

Вслед за линией 3,5/1,52 мм была стандартизована линия 2,92/1,27 мм (2,92-мм или 2,9-мм соединители). В 1978 году фирма Kevlin Microwave, США, создала серию таких соединителей КМС-SM [38]. Они имели традиционные гнездовой и штыревой контакты и были совместимы с соединителями других типов. При многократных соединениях и разъединениях гнездового и штыревого контактов происходит износ проводящего золотого покрытия и засорение проводящими частицами внутреннего канала соединителя. К тому же возможны искривление и поломка самих контактов даже при их незначительной несоосности в момент стыковки. Поэтому фирма провела работу по совершенствованию соединителя КМС-SM.

В 1985 году был разработан униполярный соединитель КМС-SL повышенной надежности (рис. 8.1) [38, 39]. Главная его конструктивная особенность — одинаковые подпружиненные кнопочные контакты, перемещающиеся на очень короткое расстояние — 0,127 мм. Конструкция торцевой части контактов обеспечивает их плотное прилегание по периферии, что особенно важно при работе в миллиметровом диапазоне длин волн. Из-за особенностей конструкции соединитель КМС-SL нельзя непосредственно сочленять

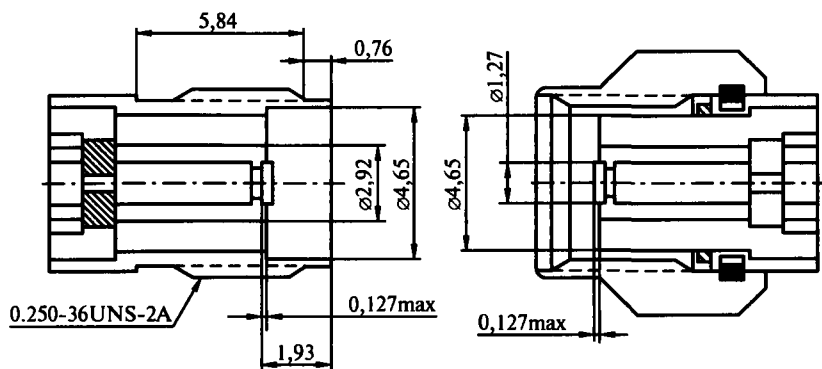


Рис. 8.1. Униполярный соединитель КМС-SL

с соединителями других типов. Для этой цели служат адаптеры, разработанные этой фирмой.

#### Основные параметры соединителя KMC-SL

Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0–40
Максимальный КСВН в рабочем диапазоне частот (на пару соединителей).....	1,4
Высокочастотные потери, дБ .....	0,25
Экранное затухание, дБ .....	–90
Гарантированное количество соединений и разъединений .....	5000

Тип применяемого полужесткого радиочастотного кабеля - RG 405/U.

В 1981 году фирма Maury Microwave разработала свой вариант 2,92-мм соединителя - MPC-3 с предельной частотой 40 ГГц для применения в радиоизмерительной аппаратуре [33]. Он был создан путем модернизации базового соединителя SMA, из которого удалили фторопластовый диэлектрик, а размеры коаксиальной линии уменьшили до 2,92/1,27 мм. КСВН соединителя MPC-3 в диапазоне частот 0–40 ГГц не превышает 1,15. Аналогичный соединитель типа WMP4 был разработан и фирмой Weinschel Engineering [33]. Широкого распространения эти соединители не получили [62].

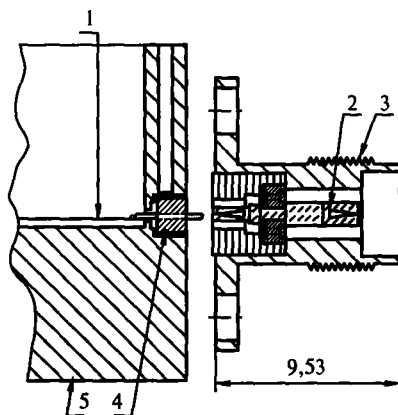


Рис. 8.2. Соединитель К:  
1 – МПЛ, 2 – внутренний проводник, 3 – СВЧ-разъем,  
4 – СВЧ-ввод, 5 – корпус изделия

Самым применяемым из 2,9-мм соединителей стал соединитель К, разработанный фирмой Wiltron в 1983 году (рис. 8.2) [13].

Название этого соединителя возникло из-за того, что он перекрывает Ка-область частот (26–40 ГГц). Соединитель К – первый из радиочастот-

ных соединителей, нашедший эффективное применение в изделиях микроэлектроники миллиметрового диапазона. В дальнейшем многие 2,9-мм соединители стали называть К-соединителями. Он особенно ценен в качестве сверхвысокочастотного коаксиально-микрополоскового перехода для передачи сигнала с микрополосковой линии на радиочастотный кабель. Соединитель К состоит из миниатюрного металlostеклянного ввода с волновым сопротивлением 50 Ом и собственно соединителя (часто называемого СВЧ-разъемом) с воздушной коаксиальной линией размерами 2,92/1,27 мм.

Ввод имеет центральный проводник диаметром 0,3 мм и наружный проводник диаметром 1,9 мм и длиной 1,4 мм. Он удобен для вывода СВЧ сигнала с полоска МГПЛ шириной 0,25 мм, размещенного на подложке толщиной 0,25 мм из окиси алюминия или дюрюида. Для создания столь миниатюрного ввода в качестве диэлектрика было применено стекло Corning 7070 с наименьшими из всех стекол, исключая кварцевое, диэлектрической проницаемостью 4,0 и тангенсом угла диэлектрических потерь  $2,1 \cdot 10^{-3}$ .

Металlostеклянный ввод впивают в корпус изделия. Его центральный проводник соединяют с гнездовым контактом соединителя, а сам соединитель прикручивают к корпусу изделия или вкручивают в него. Такая конструкция соединителя К позволяет в случае его выхода из строя производить замену даже в полевых условиях.

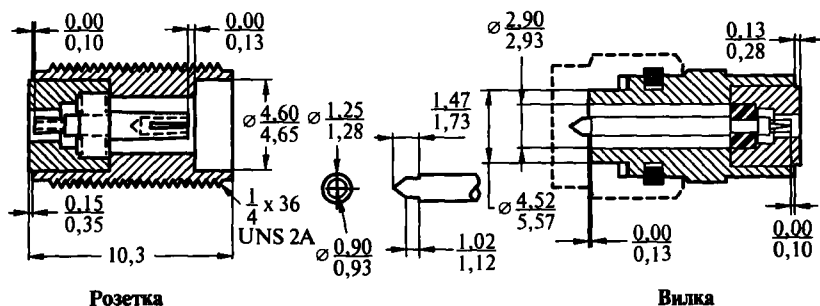


Рис. 8.3. Конструкция К-соединителя

В соединителе К (рис 8.3) внутренний проводник с обеих сторон имеет гнездовые контакты с четырьмя ламелями и закреплен в опорной диэлектрической шайбе из материала Roholit.

Он полностью совместим с соединителями SMA и APC-3,5. При этом параметры согласования пары каждого из этих соединителей с соединителем К лучше, чем для пары однотипных соединителей. Марки применяемого полужесткого кабеля — RG 405/U и 0,118 дюйма.

**Основные параметры соединителя К**

Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0–45
КСВН в диапазоне частот 0–40 ГГц .....	$1,05 + 0,005 f_{\text{ГГц}}$
Максимальный КСВН .....	1,4
Прямые потери СВЧ, дБ .....	$0,02\sqrt{f_{\text{ГГц}}}$
Экранное затухание, дБ .....	-90
Гарантированное количество соединений и разъединений .....	500

Соединители К производят фирмы M/A-COM (фирменное обозначение OS-2,9) [18], Southwest Microwave Inc [19], Connecting Devices Inc, ITT Sealectro, Radiall Inc. [55], Huber + Suhner Inc. [29], Rosenberger [57] и др. Их используют в своих разработках известные фирмы Narda Microwave, Wiltron, Tektronix и др.

## 8.2. Особенности конструкции 2,9-мм соединителей

Присоединительные и установочные размеры 2,9-мм соединителей регламентированы международными стандартами MIL-C-39012 и MIL-STD-348. Поэтому усилия разработчиков соединителей были направлены на создание более совершенной диэлектрической опорной шайбы и надежных внутренних проводников.

В конструкции соединителя любого типа имеется наружный проводник, являющийся заземленным экраном, и внутренний проводник, закрепленный в опорной диэлектрической шайбе. Такая шайба обуславливает снижение предельной частоты соединителя. Если рабочая частота не превышает 20 ГГц, размеры наружного и внутреннего проводников еще достаточно велики и ограничения на прохождение сигнала СВЧ не столь значительны. Это позволяет для фиксации проводников относительно друг друга использовать опорную шайбу из сплошного диэлектрика. С ростом частоты выше 30 ГГц для прохождения в коаксиальной линии соединителя только Т (ТЕМ)-волны необходимо уменьшать размеры линии и величину диэлектрической проницаемости опорной шайбы.

Идеальный случай — воздушная коаксиальная линия. Предельная частота воздушной линии размерами 2,92/1,27 мм равна 46,5 ГГц. Необходимо, чтобы опорная шайба также имела близкую к этой величине предельную частоту. Для этого диэлектрическую проницаемость изолятора уменьшают, замещая часть материала изолятора воздухом.

В соединителе К опорная шайба из материала Rexolit выполнена со ступенчатыми несквозными отверстиями, что позволило снизить эффективную диэлектрическую проницаемость с 2,58 до 2,0 мм и достичь предельную частоту 41,6 ГГц.

Соединители фирмы Southwest Microwave [19] выполнены с двумя опорными шайбами. Первая шайба предназначена для закрепления в корпусе соединителя внутреннего проводника. Вторая — обеспечивает его соосное расположение относительно наружного проводника, а также защиту соединителя от пыли, влаги и других загрязнений.

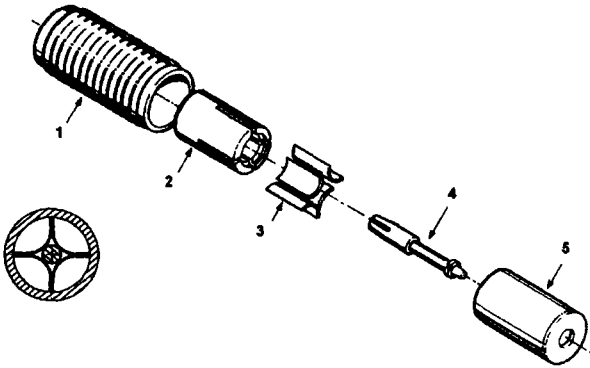


Рис. 8.4. Конструкция 2,9-мм соединителя фирмы Radiall:

- 1 — корпус соединителя, 2 — кольцо с прорезями, 3 — полоски из Картон,  
4 — внутренний проводник, 5 — втулка

Оригинальная концепция опорной диэлектрической шайбы предложена фирмой Radiall [55]. Шайба состоит из четырех пластинок толщиной 125 мкм (материал — Картон), формируемых в виде звезды вокруг проточки в центральном проводнике (рис. 8.4). Картон — полиимидный материал, выпускаемый в виде пленки. Он имеет высокую механическую прочность и сохраняет диэлектрические свойства в диапазоне температур от  $-60$  до  $+165^{\circ}\text{C}$ . Наружный проводник имеет четыре паза, в которые вставляются пластины. Сборка выполняется без применения клея. Опорная шайба занимает небольшую часть внутреннего объема, имеет эквивалентную диэлектрическую проницаемость 1,5, собственную предельную частоту 47 ГГц и практически не вносит помех в коаксиальную линию соединителя. Это позволяет увеличить ее длину и повысить жесткость конструкции.

### 8.3. Современное состояние

2,9-мм соединители имеют лучшие электрические параметры, чем базовые соединители SMA, а также ряд других преимуществ:

1. Усилие соединения двух соединителей SMA — 27 Н, а пары 2,9-мм соединителей — всего 2,3 Н [63]. Результатом малого усилия является уменьшение износа центральных контактов и повышение надежности 2,9-мм соединителей.

2. Толщина стенки наружного проводника 2,9-мм соединителей в 4 раза больше, чем у соединителей SMA (0,8 и 0,2 мм соответственно). Это обеспечивает более надежный контакт наружных проводников пары соединителей и повышение жесткости конструкции.

3. Благодаря большей толщине стенки наружного проводника и меньшему усилию соединения внутренних проводников значительно (до 10 000 циклов) увеличивается допустимое количество соединений и рассоединений без ухудшения электрических параметров пары 2,9-мм соединителей [63].

4. В отличие от соединителей SMA не требуется закрепление внутреннего проводника в корпусе при помощи эпоксидного компаунда, что повышает радиогерметичность 2,9-мм соединителей.

5. При образовании пары соединителей любых типов неизбежен зазор между внутренними проводниками вилки и розетки (гнездом и штырем). Зазор обуславливает снижение КСВН этой пары. Влияние величины зазора на КСВН для 2,9-мм соединителей значительно слабее, чем для соединителей SMA [63].

6. В 2,9-мм соединителях длина штыря кабельной вилки укорочена, а сам штырь скруглен. Это позволяет уменьшить вероятность отгибания ламелей гнездового контакта и его поломки при расположении пары соединителей под углом друг к другу в момент их стыковки. При уменьшении длины штыря сначала происходит контактирование наружных проводников, и лишь после этого штырь вилки входит в гнездо розетки.

#### 8.4. 2,9-мм коаксиально-микрополосковые переходы

КМПП состоит из герметичного 50-Омного металлостеклянного ввода и собственно соединителя. Корпусы всех соединителей изготовлены из нержавеющей стали с пассивированной поверхностью. Выпускаются соединители 2 типов:

1. Вкручиваемые в корпус изделия: Sparkplug (дословный перевод — «запальная свеча»), Thread in connectors, Screw-in.
2. Фланцевые, с 2 или 4 крепежными отверстиями во фланце.

##### Основные параметры 2,9-мм соединителей

Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0 — (40–46)
КСВН в диапазоне частот 0–40 ГГц .....	$1,05 + 0,005f_{ГГц}$
Максимальный КСВН пары соединителей .....	1,43
Высокочастотные потери, дБ .....	$(0,02 - 0,04)\sqrt{f_{ГГц}}$
Экранное затухание, дБ .....	- 90...- 100
Гарантированное количество соединений и рассоединений, не менее .....	500
Рабочий диапазон температур, °С .....	(-55...-60).. (+125 +165),

Основные параметры КМПП разных фирм практически одинаковы. Следует только подчеркнуть, что КМПП фирм Molex и Radiall выделяются своим расширенным рабочим диапазоном температур:  $-60 \dots +165^{\circ}\text{C}$  против  $-60 \dots +125^{\circ}\text{C}$  для соединителей других фирм.

Внешний вид соединителя R127601001 фирмы Radiall показан на рисунке 8.5.



Рис. 8.5. 2,9-мм КМПП фирмы Radiall

В таблице 8.2 представлены 2,9-мм соединители (герметичные КМПП и кабельные соединители) ведущих зарубежных фирм: Radiall [55], Anritsu [63], Southwest Microwave [19], M/A-COM [18], Molex [21].

Для приобретения зарубежного КМПП необходимо отдельно заказывать собственно соединитель и СВЧ-ввод. Только фирма Southwest Microwave присваивает фирменное обозначение сборке соединителя с вводом. Эта фирма выпускает наиболее широкую номенклатуру фланцевых соединителей в сочетании с СВЧ-вводами с диаметром центрального проводника не только 0,3 мм, но и 0,23, 0,38 и 0,50 мм.

Заказывая зарубежный 2,9-мм соединитель, желательно одновременно заказать и соответствующий ответный кабельный соединитель, а также набор инструментов для заделки кабеля и установки соединителей в корпус изделия.

### КАБЕЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

Соединители вилка и розетка предназначены для работы только с полужестким кабелем марок RG 405/U с наружным диаметром 2,2 мм или 0,118 дюйма (диаметр 3,0 мм). Разработаны также и приборно-кабельные соединители (панельные проходные), устанавливаемые в корпусе изделия.

В нашей стране 2,9-мм соединители пока не нашли применения. Более того, коаксиальная линия 2,92/1,27 мм даже не узаконена отечественными стандартами: ГОСТ 13317-89 и ГОСТ 20265-83 на присоединительные размеры соединителей соответственно измерительных и общего применения. Между тем 2,9-мм соединители совместимы без применения адаптеров со многими типами миниатюрных высокочастотных соединителей, обеспечивая при этом высокий уровень параметров согласования. Применение этих



Таблица 8.2. Зарубежные 2,9-мм соединители

Особенности конструкции	Фирменное обозначение соединителя				
	Radial	M/A-COM	Southwest Microwave	SV Microwave	Molex
	КОАКСИАЛЬНО-МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ				
Металлостеклянный ввод. Герметичность – $10^{-9}$ – $10^{-11}$ м <sup>3</sup> Па/с Диаметр центрального проводника 0,3 мм	R280760	8598-0294-00	290-07G	066-15-000	K100B  73415-1500 73415-1490
Бесфланцевый, вкручиваемый в корпус изделия. Вилка	R127638001	4857-3577-02	1021-01SF Соединитель + ввод 1021-00SF	–	K102M  –
То же Розетка	R127601001 (рис 8.5)	4858-3577-02	1020-01SF	SF-1575-6007	K102F  –
Фланцевый, с 2 крепежными отверстиями Вилка	R127.647.001	4851-3575-02	Фланец 15,9×5,7 мм 1013-01SF Фланец 14×4,8 мм 1013-11SF Фланец 12,7×4,8 мм 1013-21SF	–	Фланец 15,9×6,6 мм K103M  –
То же. Розетка	R127.632.001	4852-3575-02	Фланец 15,9×5,7 мм 1014-01SF Фланец 14×4,8 мм 1014-11SF Фланец 12,7×4,8 мм 1014-21SF	SF-1552-6002  –  –	Фланец 15,9×5,66 мм 73252-0020 73252-0030 Фланец 13,97×4,83 мм 73252-0060 73252-0070

Таблица 8.2. Окончание

Особенности кон- струкции	Фирменное обозначение соединителя					
	Radiall	M/A-SOM	Southwest Microwave	SV Microwave	Anritsu	Molex
КОАКСИАЛЬНО-МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ						
Фланцевый, с 4 отвер- стиями Вилка.	R127.646.001	4851-3576-02	Фланец 12,7×12,7 мм 1011-01SF	—	Фланец 12,7×12,7 мм K104M	—
			Фланец 9,5×9,5 мм 1011-11SF			
То же Розетка	R127.631.001	4852-3576-02	Фланец 12,7×12,7 мм 1012-01SF	SF-1550-6400	Фланец 12,7×12,7 мм K104F	Фланец 12,7×12,7 мм 73252-0000 73252-0010 Фланец 9,5×9,5 мм 73252-0040 73252-0050
			Фланец 9,5×9,5 мм 1012-11SF			
КАБЕЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ (КАБЕЛИ 0,118, 0,085 и 0,047 дюйма)						
Прямой. Вилка	0,085 дюйма	0,085 дюйма	0,085 дюйма	0,085 дюйма	0,085 дюйма	—
	R127.052.001	4801-7918-02	1097-04	SF-1503-6103	K101M-085	
	0,118 дюйма, R127.055.001	0,118 дюйма 4801-7985-02	0,047 дюйма 1097-03	—	0,118 дюйма K101M	
Прямой. Розетка	0,085 дюйма	0,118 дюйма	0,085 дюйма	0,085 дюйма	0,118 дюйма	—
	R127.222.001	4802-7918-02	1098-04	SF-1543-6106	K101F	
	0,118 дюйма R127.225.001		0,047 дюйма 1098-03	SF-1533-6002 0,047 дюйма SF-1533-6001		

соединителей перспективно для изделий микроэлектроники миллиметрового диапазона длин волн.

### 8.5. Микроминиатюрные соединители SMP и GPO

Соединители SMP и GPO (push-on или snap-on connectors) разработаны для применения в современных модульных конструкциях устройств СВЧ с высокой плотностью компоновки. Эти соединители имеют высокий уровень параметров в диапазоне частот 0–40 ГГц. Благодаря малым размерам они обеспечивают возможность гибкой стыковки модулей при межосевом расстоянии между соединителями менее 4,8 мм. Жесткая конструкция соединителей SMP и GPO обеспечивает сохранение их параметров при работе в условиях вибраций и ударных нагрузок, особенно присущих военным применениям. Соединители SMP и GPO имеют аналогичную конструкцию и полностью совместимы с соединителями SMP.

Соединители SMP и GPO включены в стандарты 94007/94008 DESC.

Конструкция миниатюрных соединителей SMP (OSMP) показана на рис. 4.7. Внешний вид соединителя SMP фирмы Rosenberger показан на рис. 8.6.



Рис. 8.6. Соединители SMP фирмы Rosenberger

В соединителях SMP и GPO использована система полного (блокировка) или ограниченного защелкивания, а также скользящее соединение. Во всех этих случаях применяемый соединитель розетка один и тот же. Соединители вилка для систем полного и ограниченного защелкивания отличаются лишь диаметром А (см. рис. 4.7): в первом случае  $\varnothing A = 2,9^{+0,1}$  мм, во втором —  $3,0^{+0,1}$  мм. При скользящем соединении на внутренней поверхности вилки отсутствует канавка для защелкивания пружинящей входной части розетки.

Разработаны и выпускаются следующие варианты соединителей SMP и GPO: выводы печатных плат, прямые и угловые кабельные соединители розетка, соединители розетка для поверхностного монтажа, одноканальные

адаптеры типа розетка для соединения при большой несоосности (blind mate interconnect, bullet – дословно «пуля») и адаптеры для сочетания с соединителями SMA, 2,9-мм, 2,4-мм и 1,85-мм.

Корпусы соединителей изготавливают из бериллиевой бронзы, латуни или нержавеющей стали, внутренний проводник розетки – из упрочненной бериллиевой бронзы. Внутренний проводник герметичного соединителя вилка выполняют из сплава ковар, изоляторы – из фторопласта, торлона (полиамидный материал) и стекла Corning 7070 (для герметичных КМПП). Основным видом покрытия металлических деталей является золото.

Соединители изготавливают с высокими точностью размеров и чистотой обработки поверхности. Допуски на размеры – 0,0125 и 0,025 мм, на углы – 5°. Высота неровностей поверхностей – не более 0,08 мкм.

Герметичный соединитель вилка (shroud, кожух) выполнен с внутренним металлостеклянным спаем либо сочетается с 50-Омным металлостеклянным вводом.

Разработаны миниатюрные вилки разной конструкции для крепления в корпусе изделия ввинчиванием, запрессовыванием и при помощи фланцевого соединения. Соединитель GPO № A1A1-0001-01, например, весит всего 0,17 г.

Соединители SMP и GPO предназначены для работы в сочетании только с миниатюрными полужесткими кабелями 0,085 и 0,047 дюйма.

Параметры соединителей SMP и GPO представлены в табл. 8.3 [18, 21, 55, 57, 58, 64].

**Таблица 8.3. Параметры соединителей SMP и GPO**

Параметр	Соединители, фирма				
	OSMP, M/A COM	GPO, Corning Gilbert	SMP, Radiall	SMP, Molex	SMP, Amphenol
Электрические параметры					
Волновое сопротивление, Ом	50				
Рабочий диапазон частот, ГГц	0–40				
Максимальный КСВН (в диапазоне частот, ГГц)	1,1 (0–23) 1,15 (23–26) 1,40 (26–40)	1,15 (0–26,5) 1,5 (26,5–40)	1,15 (0–18) 1,35 (18–26,5) 1,5 (26,5–40)	1,5 max	1,15 (0–26,5) 1,5 (26,5–40)
Прямые потери СВЧ, дБ (на частотах, ГГц)	$0,01\sqrt{f}$	-	$0,12\sqrt{f}$	$\leq 0,1$ (1)	$0,1\sqrt{f}$
Экранное затухание, дБ (на частотах, ГГц)	-80 (до 3) -65 (3–25)	-	-80 (до 3) -65 (3–26,5)	-65	-
Минимальное сопротивление изоляции, МОм	5000				
Рабочее напряжение, В	335	500	335	-	-

Таблица 8.3. Окончание

Параметр	Соединители, фирма				
	OSMP, M/A COM	GPO, Corning Gilbert	SMP, Radiall	SMP, Molex	SMP, Amphenol
Сопротивление, Ом, проводников: внутреннего наружного	$6 \cdot 10^3$ $2 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$ -	- -	$6 \cdot 10^3$ $2 \cdot 10^3$	-
Механические параметры					
Гарантированное количество циклов соединение-рассоединение: полное зашелкивание, ограниченное зашелкивание, скользящее соединение	100 500 1000	- 500 1000	100 500 1000	500	100 500 1000
Усилие соединения, Н: полное зашелкивание, ограниченное зашелкивание, скользящее соединение	44,5 22,2 8,9	40 31 8,9	68 45 9	-	40,5 31,5 9
Усилие рассоединения, Н: полное зашелкивание, ограниченное зашелкивание, скользящее соединение	8,9 6,6 2,2	31 22,2 2,2	22 9 2,2	-	-
Усилие удержания, Н, внутренних проводников	6,6	6,6	6,8	-	-
Допустимая несоосность пары соединителей аксиальная радиальная	+0,25 +0,5	$\pm 0,25$ $\pm 0,25$	0-0,25 $\pm 0,25$	-	$\pm 0,25$ $\pm 0,25$
Рабочий диапазон температур, °С	-65.. +165				-

На рис. 8.7. приведены примеры применения соединителей SMP.

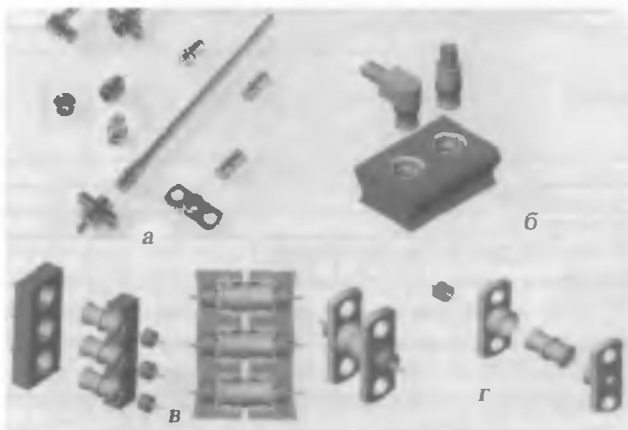


Рис. 8.7. Соединители SMP: а – внешний вид; б – прямой и угловой кабельные соединители для модулей; в – Герметичное резьбовое соединение модулей с помощью адаптеров; г – герметичное соединение модулей с помощью фланцевых КМПП и адаптера

## 8.6. Соединители OS-50P

Соединители OS-50P были разработаны фирмой M/A-COM специально для быстрого соединения между собой модульных сборок СВЧ. Эти blind-mate-соединители (см. раздел 4.3.3) имеют коаксиальную линию размерами 1,98/0,86 мм (рис. 4.8).

Соединитель вилка устанавливают в стенку корпуса пайкой, фланцевым соединением или запрессовыванием. В последних двух случаях внутрь корпуса вилки входит 50-Омный металlostеклянный ввод, впаянный в стенку корпуса изделия. Смонтированные вилки двух модулей соединяют между собой при помощи специального адаптера розетка-розетка. Межцентровое расстояние между двумя соединителями — 5,4 мм. При соединении вилки и розетки допускается аксиальная несоосность 0,127 мм, радиальная несоосность  $\pm 0,076$  мм.

Разработаны следующие модификации соединителя OS-50P: проходные кабельные соединители вилка и розетка, панельно-кабельные соединители, вводы СВЧ розетка и вилка со скользящим контактом, устанавливаемые запрессовыванием и пайкой, герметичные КМПП составные и с внутренним металlostеклянным спаем, адаптеры розетка-розетка.

Соединитель OS-50P имеет следующие параметры:

### Параметры соединителя OS-50P

Волновое сопротивление, Ом.....	50
Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0—40
Максимальный КСВН	
(в диапазоне частот, ГГц) .....	1,22 (0—18), 1,29 (18—26,5), 1,43 (26,5—40)
Прямые потери СВЧ, дБ .....	$0,04\sqrt{f_{\text{ГГц}}}$
Экранное затухание, дБ .....	$-(90-f_{\text{ГГц}})$
Рабочее напряжение, В .....	500
Сопротивление изоляции, МОм .....	5000
Рабочий диапазон температур, °C .....	-55... +125

Кабельные соединители OS-50P предназначены для работы с полужестким кабелем 0,085 и 0,047 дюйма.

## СОЕДИНИТЕЛИ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 50–110 ГГц

### 9.1. Параметры воздушных коаксиальных линий соединителей

Для понимания того, как происходило дальнейшее освоение соединителями миллиметрового диапазона длин волн, рассмотрим основные параметры воздушных коаксиальных линий (табл. 9.1) [57].

**Таблица 9.1.** Параметры воздушных коаксиальных линий

Тип соединителя	Размеры проводников линии, мм		Волновое сопротивление, Ом	Диапазон частот, ГГц $f_{\min} - f_{\max}$	КСВН в диапазонах частот		Прямые потери СВЧ, дБ/100 мм при $\Gamma_{\max}$
	наружного	внутреннего			$4 - f_{\min}$	$f_{\max} - 4$	
3,5-мм	$3,50 \pm 0,005$	$1,52 \pm 0,01$	$50 \pm 0,5$	0,3–26,5	1,020	1,036	0,30
2,9-мм	$2,92 \pm 0,05$	$1,27 \pm 0,007$	$50 \pm 0,6$	0,3–40	1,026	1,065	0,50
2,4-мм	$2,4 \pm 0,01$	$1,04 \pm 0,01$	$50 \pm 0,95$	0,4–50	1,032	1,105	0,70
1,85-мм	$1,85 \pm 0,007$	$0,8 \pm 0,007$	$50 \pm 1,0$	0,5–65	1,041	1,135	0,90
1,0-мм	$1,0 \pm 0,007$	$0,434 \pm 0,005$	$50 \pm 1,15$	0,8–110	1,135	1,499	2,00

С увеличением предельной частоты размеры коаксиальной линии уменьшаются, а их точность возрастает. Также возрастают величины КСВН и прямых потерь в линии передачи.

### 9.2. 2,4-мм соединители

Достижение частоты 50 ГГц стало следующим этапом продвижения коаксиальных соединителей в миллиметровом диапазоне длин волн. Программа создания соединителей с предельными частотами 50, а затем 65 ГГц была разработана 3 крупнейшими фирмами США: Hewlett-Packard, Amphenol и M/A-COM [65–68]. Работа велась по созданию сразу трех модификаций соединителей: промышленной, инструментальной и метрологической. Параллельно разрабатывались и соответствующие адаптеры.

Создание соединителя с предельной частотой 50 ГГц потребовало перехода на воздушную коаксиальную линию размерами 2,4/1,04 мм (рис. 9.1).

Внутренний проводник диаметром 1,04 мм, изготовленный из бериллиевой бронзы и покрытый износостойким золотом, закреплен в опорной

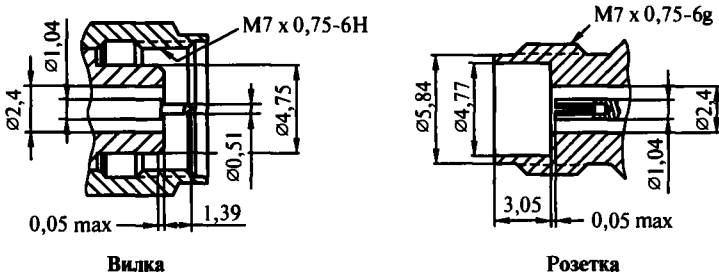


Рис. 9.1. 2,4-мм соединители вилка и розетка

диэлектрической шайбе. Как и в соединителе К, шайба выполнена с шестью несквозными отверстиями для снижения эффективной диэлектрической проницаемости. Соединение внутренних проводников вилки и розетки происходит при введении штыря вилки диаметром 0,511 мм в гнездо с 4 ламелями розетки. Корпус соединителя выполнен из коррозионностойкой нержавеющей стали с пассивированной поверхностью. Следует подчеркнуть, что впервые на корпусе соединителя применена метрическая резьба M7×0,75-6g, поэтому для совместимости с базовыми соединителями SMA, APC-3,5, К необходимы адаптеры. Появление метрической резьбы на корпусе соединителя 2,4-мм (а в дальнейшем и на корпусе 1,85-мм соединителя) объясняется желанием не смешивать эти дорогостоящие соединители с менее прецизионными соединителями (такими, как SMA), чтобы не повредить их при соединении с последними [65].

Толщина стенки внутреннего гнездового проводника 2,4-мм соединителя в 1,5 раза меньше, чем у соединителей SMA и К (0,17 и 0,25 мм соответственно), но за счет меньшей длины ламелей обеспечивается его достаточная жесткость. В то же время наружный проводник 2,4-мм соединителя имеет большую толщину стенки — 1,2 мм (у соединителей К — 0,8, SMA — 0,25 мм). Благодаря этому улучшается контакт по наружным проводникам вилки и розетки и повышается жесткость конструкции соединителя.

Во избежание поломки при соединении вилки и розетки необходимо, чтобы сначала происходил контакт наружных проводников и только после этого штырь вилки входил бы в гнездо розетки. Для этого длина штыря 2,4-мм соединителя вилка уменьшена до 1,4 мм.

Необходимо также периодически контролировать штырь и гнездо. Они должны быть незагрязненными и не иметь повреждений: отгибание ламелей гнезда, канавку на штыре в месте контакта с гнездом. Такая канавка образуется, если при соединении вилки и розетки имеет место вращение корпуса вилки вместо вращения гайки. Ее образование приводит к ухудшению контакта внутренних проводников и к ошибкам измерительной аппаратуры.

Разработаны следующие типы 2,4-мм соединителей: кабельные, коаксиально-микрополосковые переходы, кабельные сборки и адаптеры. Фир-



мой М/А-СОМ [18, 42] были впервые разработаны коаксиально-микрополосковые переходы вилка и розетка, конструкция которых имеет следующие особенности:

- фланцевое соединение с корпусом изделия. Используются квадратные фланцы размерами 12,7×12,7 мм с четырьмя крепежными отверстиями и прямоугольные фланцы размерами 15,9 х 7,0 мм с двумя крепежными отверстиями;
- центральный проводник КМПП в месте выхода на МПЛ имеет прямоугольное сечение: толщина 0,1 мм, ширина 0,3 мм. Длина проводника — 0,3 мм;
- разработаны модификации КМПП для сочетания с МПЛ на подложках из материала с низкой диэлектрической проницаемостью (2,2) при ширине полоска 0,3 и 0,5 мм, а также для МПЛ с полоском шириной 0,38 и 0,25 мм на подложках из окиси алюминия (alumina,  $\epsilon = 9,8$ ) толщиной 0,38 и 0,25 мм.

Коаксиально-микрополосковые переходы выпускают в негерметичном и герметичном (скорость натекания менее  $10^{-9}$  м<sup>3</sup>·Па/с) исполнениях. В последнем случае конструкция 2,4-мм соединителя сходна с конструкцией соединителя К. Герметичность обеспечивается 50-Омным металлостеклянным вводом, соединяемым с микрополосковой линией. Диаметр наружного проводника ввода 1,9 мм, внутреннего проводника — 0,3 мм.

Фирма Amphenol [12] производит 2,4 -мм соединители APC-2,4 розетку и вилку, а также серию адаптеров (22 типа) для сочетания с соединителями 6 типов (SMA, APC-3,5, К и др.).

Фирмой Hewlett-Packard (ныне Agilent) [69–70] разработаны соединители розетка метрологического назначения, в которых гнездовой контакт выполнен без ламелей (slotless — без прорезей). Традиционные гнезда с ламелями незначительно изменяют свой наружный диаметр при введении штыря вилки, что приводит к некоторому ухудшению КСВН пары соединителей. Метрологические соединители этой фирмы применяются для калибровки радиоизмерительной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн.

Кабельные соединители предназначены для работы с полужесткими радиочастотными кабелями RG 405/U и 0,096 дюйма, а также со специально разработанным фирмой Precesion Tube Corp. полужестким кабелем диаметром 2,4 мм [33].

#### Основные параметры 2,4-мм соединителей

Волновое сопротивление, Ом .....	50
Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0–50
Максимальный КСВН	
(в диапазоне частот, ГГц) ..	1,10 (0–18); 1,13 (18–26,5); 1,29 (26,5–50)
Прямые потери СВЧ, дБ .....	$0,05\sqrt{f_{ГГц}}$
Экранное затухание, дБ .....	$-(120 - f_{ГГц})$



Рабочее напряжение, В .....	400
Максимальная пропускаемая мощность, Вт .....	10 Вт на частоте 10 ГГц, 4,5 Вт на частоте 50 ГГц
Гарантированное количество соединений и разъединений .....	500

2,4-мм соединители нашли применение при создании широкополосной радиоизмерительной аппаратуры, а также в изделиях микроэлектроники СВЧ на монолитных интегральных схемах. В ряде случаев эти соединители стали альтернативой волноводов.

2,4-мм соединители выпускают фирмы M/A-COM, (фирменное обозначение OS-2,4 или OS-50) [18], Amphenol (APC-2,4) [12], Rosenberger (RPC-2,4) [57], Southwest Microwave [19], Agilent [69, 70]. Кабельные сборки с такими соединителями, имеющие малые потери, производит фирма Insulated Wire Inc. [33].

### 9.3. 1,85-мм соединители

Эти соединители с предельной частотой 65 ГГц называют еще V-соединителями, так как они перекрывают V-диапазон частот (50–75 ГГц) [11]. Они были созданы в середине 80-х годов прошлого века фирмой Hewlett-Packard. В них реализована воздушная коаксиальная линия размерами 1,85/0,83 мм и использованы базовые решения, примененные при создании 2,4-мм соединителей (рис. 9.2).

В обоих соединителях применена резьба M7×0,75-6g, что делает 1,85 и 2,4-мм соединители совместимыми между собой. Для работы с SMA; 3,5; 2,92-мм и другими соединителями разработаны соответствующие адаптеры. Серию таких адаптеров HP1190X выпускает фирма Anritsu [63]. Кабельные сборки с 1,85-мм соединителями производит фирма Insulated Wire Inc [33].

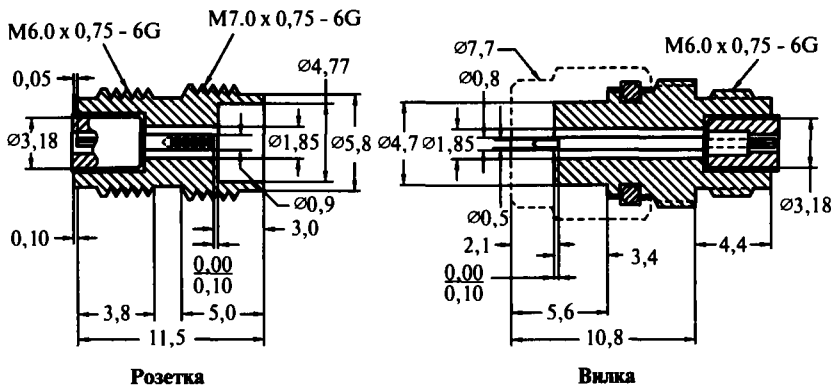


Рис. 9.2. 1,85-мм соединители розетка и вилка

Серия V-соединителей включает в себя кабельные соединители, составные КМПП, кабельные сборки и адаптеры. В таблице 9.2 в качестве примера представлена номенклатура этих соединителей, выпускаемых фирмой Anritsu [63].

**Таблица 9.2.** 1,85-мм соединители фирмы Anritsu

Модификация соединителя	Тип соединителя
V101M	Кабельный соединитель вилка
V101F	Кабельный соединитель розетка
V102M	Вкручиваемый КМПП вилка
V102F	Вкручиваемый КМПП розетка
V103M	Фланцевый составной КМПП с двумя крепежными отверстиями вилка
V103F	Фланцевый составной КМПП с двумя крепежными отверстиями розетка
V100, V100B	50-Омные металлоглазанные вводы для соединителей V102 и V103
V110-I	Скользкий контакт для соединения КМПП с МПЛ
V085	Полужесткий радиочастотный кабель диаметром 2,16 мм (длина 152 см)

Конструкция КМПП аналогична конструкции К и 2,4-мм соединителей. Вкручиваемые КМПП применяют при большой толщине стенки изделия, при малой толщине — фланцевые, с двумя крепежными отверстиями во фланце. Металлоглазанный ввод, применяемый в составных КМПП, изготовлен с центральным проводником диаметром 0,23 мм. В качестве изолятора использовано стекло Corning 7070. Металлические поверхности ввода покрыты золотом по подслою никеля.

Надежность любого радиочастотного соединителя зависит прежде всего от усилия вхождения штыря вилки в гнездо розетки и соосности пары соединителей в момент сочленения. Для повышения надежности 1,85-мм соединителя усилие вхождения штыря в гнездо уменьшено вдвое по сравнению с 2,4-мм соединителями, а длина штыря сделана минимально возможной, чтобы уменьшить влияние несоосности.

Кабельные соединители вилка и розетка рекомендуется применять с полужестким кабелем диаметром 2,16 мм [63]. Этот кабель выполнен с микропористым фторопластовым диэлектриком и медным внутренним проводником. Кабель обеспечивает высокую фазовую стабильность и низкий уровень КСВН — 1,35 на частоте 60 ГГц.

Кроме того, выпускаются адаптеры серии HP1190 для совместимости с соединителями других типов.

#### Основные параметры 1,85-мм соединителей

Волновое сопротивление, Ом	50
Рабочий диапазон частот, ГГц	0–65
Максимальный КСВН	
(в диапазоне частот, ГГц)	1,10 (0–18); 1,13 (18–26,5); 1,29 (26,5–50)
Прямые потери СВЧ, дБ	$0,05\sqrt{f_{\text{ГГц}}}$
Экранное затухание, дБ	$-(120 - f_{\text{ГГц}})$

Рабочее напряжение, В.....	400
Максимальная пропускная мощность, Вт .....	10 Вт на частоте 10 ГГц, 4,5 Вт на частоте 50 ГГц
Гарантированное количество соединений и разъединений .....	500

Соединители представляют интерес для вывода сигналов в сверхширокополосных анализаторах цепей на частотах до 65 ГГц. Первый такой анализатор модели 360 с коаксиальным выходом, работающий в диапазоне частот 40–60 ГГц, был создан фирмой Wiltron.

Фирмы, разрабатывающие коаксиальные устройства миллиметрового диапазона, также используют 1,85-мм соединители. Еще в 1989 году фирмой Microwave Research and Development был создан в этом диапазоне длин волн первый направленный ответвитель с номинальным коэффициентом связи 13 дБ, направленностью 10 дБ и допустимой мощностью 20 Вт. Ведутся работы по созданию промышленных коаксиальных устройств миллиметрового диапазона, преимущественно военного назначения, для систем локальной связи, наведения ракет и узкополосных радаров.

1,85-мм соединители выпускают фирмы M/A-COM (OS-65) [18], Ampfenol (APC-1,85) [12], Rosenberger (RPC-1,85) [57], SM Electronics (SMC185).

## 9.4. VP- и GPPO- соединители

Вслед за V-соединителем со стандартными гнездовым и штыревым контактами и резьбовым соединением наружных проводников фирма Anritsu создала соединители VP (snap-on или blind mate) [63]. Их конструкция аналогична конструкции ранее рассмотренных соединителей SMP и GPO. Соединители VP могут работать только в сочетании с адаптерами розетка – розетка. Наружный проводник адаптеров представляет собой цангу с 6 ламелями. Число ламелей увеличено, чтобы уменьшить усилие соединения с вилкой вдвое по сравнению с соединителем SMP. Это позволило в лабораторных условиях осуществлять до 1000 соединений пары розетка и вилка без существенного износа контактов и ухудшения параметров. Гарантированное же количество соединений и разъединений – 500.

Аналогичные соединители типа GPPO с предельной частотой 65 ГГц созданы фирмой Corning Gilbert [64]. Они имеют следующие параметры:

Основные параметры VP-соединителей	
Волновое сопротивление, Ом.....	50
Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0–65
Максимальный КСВН (в диапазоне частот, ГГц) .....	1,10 (0–26,5); 1,13 (26,5–50)
Экранное затухание, дБ .....	– (120 – $f_{ГГц}$ )

Рабочее напряжение, В.....	335
Сопротивление изоляции, МОм.....	5000
Усилие соединения вилки и розетки, Н.....	20,2
Усилие разъединения, Н.....	11,2
Рабочий диапазон температур, °С.....	-65...+165

Соединители VP и GPRO предназначены для быстрого соединения модулей СВЧ миллиметрового диапазона длин волн. Они допускают соединение без ухудшения параметров вилки и розетки при их радиальной и осевой несоосности  $\pm 0,25$  мм. Соединители могут быть установлены в модуле при межцентровом расстоянии между ними всего 3,4 мм.

### 9.5. 1,0-мм соединители

В 1,0-мм соединителе (другое название W-соединитель) была впервые реализована воздушная коаксиальная линия размерами 1,0/0,434 мм, выполненными с точностью всего 5 мкм (рис. 9.3) [70, 71].

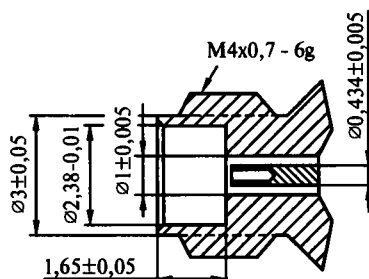


Рис. 9.3. 1-мм соединитель розетка

Соединитель имеет традиционную конструкцию штырь–гнездо. Закрепление соединения вилки и розетки достигается при помощи накидной гайки с метрической резьбой M4×0,7, имеющей размер «под ключ» 6 мм. Для совмещения с соединителями других типов необходимо использовать адаптеры. Диаметр ответного штыря равен всего лишь 0,25 мм. Разрезное гнездо с 4 ламелями длиной 1 мм и шириной паза между ними 0,06 мм имеет толщину стенки 0,09 мм. Внутренний проводник соединителя закреплен в диэлектрической шайбе со специально подобранным согласованием.

При создании столь миниатюрного соединителя были приняты необходимые меры по предотвращению поломки его внутреннего проводника. Присоединительные размеры соединителя обеспечивают контакт внутренних проводников розетки и вилки только после соединения наружных проводников соединителей. Поверхности штыря и гнезда выполнены с исключительно высокой чистотой. Естественно, что при столь малых размерах

внутренних проводников розетки и вилки их соосность в момент соединения должна быть близка к идеальной. Было показано, что при нулевой несоосности количество циклов соединения и разъединения практически неограниченно [71]. Но уже несоосность всего 2 мкм уменьшает количество циклов до 10 000. В реальных соединителях гарантированное количество циклов соединения и разъединения без ухудшения электрических параметров — не менее 3000. Следует подчеркнуть, что 1-мм соединители, так же, как и 1,85-мм и 2,4-мм соединители, требуют исключительно бережного обращения при работе с ними.

1-мм соединитель предназначен для работы с полужестким радиочастотным кабелем диаметром 0,047 дюйма.

#### Основные параметры 1-мм соединителей

Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0—110
Максимальный КСВН в рабочем диапазоне частот.....	1,28
Прямые потери СВЧ, дБ.....	менее 0,6

Фирма Agilent выпускает 1-мм КМПП розетка типа 11923A для применения в измерительной аппаратуре с диапазоном частот до 110 ГГц [69]. В этом диапазоне частот его КСВН не превышает 1,38, а прямые потери — менее 1 дБ. Кроме того, разработаны метрологические соединители розетка с неразрезным гнездовым контактом. Аналогичные КМПП розетка типов W1-103F и W1-105F и вилка — W1-105M выпускает фирма Anritsu [63]. Обе эти фирмы выпускают большую серию адаптеров для совмещения 1-мм соединителей с соединителями 2,4 мм и 1,85 мм. КСВН адаптеров не превышает 1,22 на частотах до 50 ГГц, 1,29 — на частотах до 75 ГГц и 1,5 — на частотах до 110 ГГц, а прямые потери СВЧ составляют от 0,5 до 1,0 дБ.

С 1995 года 1-мм соединитель и адаптеры выпускает фирма Rosenberger [57].

1-мм соединитель является удачным дополнением к ранее разработанным 1,85- и 2,4-мм соединителям. Можно констатировать, что он стал ключевым компонентом при создании ультраширокополосной радиоизмерительной аппаратуры, работающей на частотах до 110 ГГц. Фирма Cascade Microtech создала измерительные зондовые устройства с использованием 1-мм соединителей [72]. Фирма Agilent разработала уникальный анализатор цепей HP8510XF на частоты до 110 ГГц и все необходимые аксессуаров для его настройки и калибровки, включая адаптеры и кабельные сборки.

Ведутся также работы по созданию оптико-электрических конверторов, элементов устройств самоходных радаров и беспроводной связи соответствующего частотного диапазона с применением W-соединителей.

## 9.6. Некоторые итоги

Начиная с 1962 года предельная частота соединителей выросла с 18 до 110 ГГц (табл. 9.3). Соединители заняли свое место среди радиокомпонентов миллиметрового диапазона длин волн, потеснив волноводы, хотя еще 30 лет тому назад это казалось лишь заманчивой идеей. Размеры коаксиальной линии и присоединительные размеры соединителей жестко регламентированы стандартом IEEE STD 287. Поэтому параметры соединителей, особенно измерительных и метрологических, были улучшены за счет совершенствования конструкции внутренних контактов и опорной диэлектрической шайбы, а также повышения точности изготовления.

Высокие частоты требуют все меньших размеров коаксиальных линий и все большей точности их размеров. Конструкторы соединителей ограничены как законами физики, так и достигнутым уровнем производства. Сложно прогнозировать дальнейшие шаги по созданию коаксиальных устройств, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн. Однако не исключено, что уже в ближайшие годы мы можем стать свидетелями появления таких устройств, работающих в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

Таблица 9.3. Основные параметры базовых зарубежных соединителей

Размеры коаксиальной линии, мм (тип диэлектрика)	Типы соединителей	Фирма, год разработки	Предельная рабочая частота, ГГц	Максимальный КСВН (в диапазоне частот, ГГц)
4,1/1,27 (фторопласт)	SMA (OSM)	M/A-COM, 1962	18	1,25
3,5/1,52 (воздух)	APC-3,5	Amphenol, 1976	34	1,15
	WSMA	Wiltron, 1979		
2,92/1,27* (воздух)	KMC-SM	Kevlin Microwave, 1979	40	1,4
	KMC-SL	Kevlin Microwave, 1985		1,15
	MPC-3	Maury Microwave, 1981		
	WMP4	Weinschel Engineering		
	K	Wiltron, 1983		1,4
2,4/1.04 (воздух)	APC-2,4 OS-50 RPC-2,4	Amphenol, M/A-COM, Hewlett-Packard, 1986 Rosenberger,	50	1,10 (0—18) 1,13 (18—26,5) 1,29 (26,5—50)
1,85/0,83 (воздух)	V APC-1,85 OS-65 RPC-1,85		65	1,12 (0—30) 1,30 (30—65)
1,0/0,534 (воздух)	W APC-1.0 RPC-1.0	Amphenol Products, M/A-COM, Hewlett-Packard, 1989 Rosenberger, 1995	110	1,28

\* Обзор работ, посвященных 2,9-мм соединителям – [73]

## ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

### 10.1. Соответствие отечественных и зарубежных соединителей

Отечественные соединители общего применения должны соответствовать требованиям ГОСТ 20265-83 [74]. К ним относятся прежде всего герметичные КМПП и кабельные соединители, применяемые в изделиях современной микроэлектроники СВЧ.

Измерительные и метрологические соединители выпускаются в соответствии с ГОСТ 13317-89 [75]. Они предназначены для применения в радиоизмерительной аппаратуре СВЧ-диапазона.

Зарубежные соединители соответствуют требованиям военного стандарта MIL-C-39012. В последнее время зарубежные соединители находят все большее применение в отечественных разработках [76].

Соответствие размеров коаксиальной линии и присоединительных размеров отечественных и зарубежных соединителей вилка (В) и розетка (Р) показано в таблице 10.1.

**Таблица 10.1.** Соответствие отечественных и зарубежных соединителей

Размеры коаксиальной линии, мм	Типы соединителей	
	Отечественные	Зарубежные
	ГОСТ 20265-83, ГОСТ 13317-89	MIL-C-39012
7/3,04	III (В, Р)	N, APC-7, RPC-7
4,1/1,27;3,5/1,52	IX (В, Р)	SMA
3/0,94	отсутствуют	SMC, SMB
2,92/1,27	отсутствуют	2,9-мм соединители (K, SMA 2,9, SMP, GPO и др.)
2,4/1,042	I (В, Р)	2,4-мм соединители (APC-2,4, OS-50, RPC-2,4 и др.)
1,85/0,83	отсутствуют	1,85-мм соединители (APC-1,85, OS-65, VP, GPPO)
1/0,534	отсутствуют	1,0-соединители (APC-1,0, RPC-1,0)

Отсутствие в отечественных стандартах упоминания о 4 (наиболее миниатюрных) из 7 стандартизованных коаксиальных линий свидетельствует о значительном отставании в области соединителей прежде всего миллиметрового диапазона длин волн.



## 10.2. Отечественные производители радиочастотных соединителей

Разработку и выпуск радиочастотных соединителей в нашей стране осуществляют следующие предприятия: ФГУП ПО «Октябрь» (г. Каменск-Уральский) [25], ФГУП НИПИ «Кварц» (г. Нижний Новгород) [77, 78], ОАО ЦНИИИА (г. Саратов) [2, 79], НПП «Спецкабель» (г. Москва) [80], НПФ «Микран» (г. Омск) [81], ФГУП «НПП «Исток» (г. Фрязино) [23, 26]. Герметичные КМПП и кабельные соединители общего применения для изделий микроэлектроники СВЧ выпускают предприятия ФГУП ПО «Октябрь» (единственное в нашей стране предприятие с крупносерийным производством соединителей), ФГУП «НПП «Исток» и в последнее время НПФ «Микран» (мелкосерийные производства). Остальные предприятия располагают мелкосерийным производством негерметичных измерительных соединителей.

### 10.2.1. Соединители ФГУП ПО «Октябрь»

Не имеет смысла говорить обо всех соединителях с волновым сопротивлением 50 Ом, выпускаемых этим предприятием: около 250 наименований негерметичных и 40 герметичных соединителей в соответствии с ВРО 364.049 ТУ, ВРО 364.039 ТУ, ВРО 364.047 ТУ, ВРО 364.015 ТУ. Большинство из них по своим параметрам и конструктивному исполнению уступает зарубежным аналогам и не соответствует требованиям современной микроэлектроники СВЧ. Поэтому ограничимся рассмотрением параметров лишь некоторых, наиболее применяемых, по нашему мнению, соединителей (табл. 10.2).

Обозначение соединителей состоит из букв СР – соединитель радиочастотный или СРГ – соединитель радиочастотный герметичный. Через дефисы поставлены величины волнового сопротивления – 50 Ом и порядковый номер разработки данного соединителя. В конце обозначения указаны вид изоляции (Ф – фторопласт) и исполнение соединителя (В – всеклиматическое). По номеру разработки можно определить способ соединения пары соединителей. Номера с 101 по 500 и выше 700 означают резьбовое соединение [25].

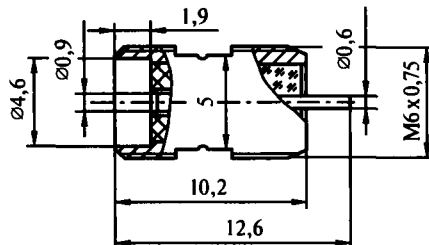


Рис. 10.1. КМПП СРГ-50-751ФВ

Наибольшее распространение получили герметичные КМПП СРГ-50-751ФВ (их часто называют «Град» по названию темы разработки), выпуск которых был освоен в начале 80-х годов прошлого века (рис. 10.1). Внешний вид этого соединителя показан на рис. 10.2, а.

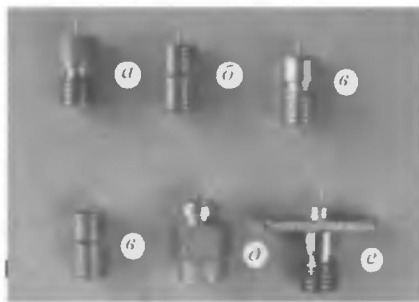


Рис. 10.2. Герметичные КМПП ФГУП ПО «Октябрь» и ФГУП «НПП «Исток»:  
(а) СРГ-50-751ФВ; (б) ТС2.236.072; (в) ТС2.236.072-01; (г) КРПГ434511.015-01;  
(д) ТС2.236.074; (е) КРПГ434511.004 с СВЧ-вводом КРПГ433434.015-03

Однако по основным параметрам они уступают зарубежным аналогам типа SMA, разработанным еще в 1962 году. Из опыта применения соединителей СРГ-50-751ФВ известно, что при их работе в изделиях СВЧ возможен «выброс» КСВН в диапазоне частот 11-14 ГГц [23]. Этот нежелательный эффект, по-видимому, обусловлен возрастанием переходного сопротивления внутреннего проводника.

Корпуса и центральные проводники КМПП покрыты сплавом олово-висмут или никелем. Заметим, что в зарубежных, даже самых дешевых, коммерческих соединителях центральный проводник покрывают только золотом. Справедливости ради подчеркнем, что в последнее время в ФГУП ПО «Октябрь» начат выпуск КМПП СРГ-50-751ФВ-1, в котором гнездо покрыто золотом, однако центральный проводник по-прежнему покрыт сплавом олово-висмут. Цена этого соединителя возросла на 10%.

Среди разработок ФГУП ПО «Октябрь» обращают на себя внимание КМПП СРГ-50-876ФВ и СРГ-50-876ФВМ. По своей конструкции и параметрам они аналогичны СРГ-50-751ФВ, но отличаются видом резьбы на корпусе. Первый из них выполнен с дюймовой резьбой 0.250 36UNS 2A на всей длине корпуса. Во втором — часть резьбы метрическая М6х0,75 (для установки в корпус отечественного изделия), а выходная часть — дюймовая (для сочетания с зарубежными кабельными соединителями без применения адаптеров). Предприятие поставляет соединители с приемкой 1, 5 и 9. Различие в стоимости соединителя одного типа, поставляемого с приемкой 1 и соответственно 5 и 9 приблизительно 1,5 и 3 раза. Кроме того, установлены повышающие коэффициенты к базовой цене для соединителей

крупносерийного производства в зависимости от размера поставляемой партии. За базовую принята цена соединителя в партии более 500 штук. При размере партии до 10 штук цена возрастает в 4,5 раза, до 50 штук – в 2 раза, до 100 штук – в 1,5 раза и до 500 штук – в 1,1 раза.

Таблица 10.2. Соединители общего применения ФГУП ПО «Октябрь»

Обозначение соединителя	Тип (табл. 10.1)	Рабочий диапазон частот, ГГц	Максимальный КСВН	Прямые потери СВЧ, дБ, не более	Экранное затухание, дБ	Габаритные размеры, см (масса, г)	Марки применяемого кабеля Вид резьбы на корпусе КМПП
1							
Кабельные соединители вилка (В) и розетка (Р) ВРО 364.049 ТУ							
СР-50-724ФВ	IX(В)		1,5	-	- 40	Ø9,2x29,5 (7,4)	РКС0-2-11; 16; 21,22
СР-50-726ФВ					- 60	9x18 (2,8)	РКС0-2-25;28;29
СР-50-748ФВ						Ø12x31 (11)	РКС0-3,7-31С
СР-50-725ФВ приборно-кабельная	IX(Р)	0-18			- 60	12,5x15,5 (4,4)	РКС0-2-25,28,29
СР-50-747ФВ приборно-кабельная						12,5x29 (11)	РКС0-3,7-31С
СР-50-727ФВ приборная						Ø13x13,5 (2,2)	-
Герметичные КМПП ВРО 364.047 ТУ							
СРТ-50-716ФВ	IX(Р)	0-10	2,0	-	-	Ø 6x14,2 (1,5)	Резьба на корпусе М6x0,5
СРТ-50-717ФВ						Ø 6x13,8 (1,5)	Резьба М6x0,75
Герметичные КМПП ВРО 364.049 ТУ							
СРТ-50-751ФВ	IX(Р)	0-18	1,5	0,3	- 60	Ø6x13,1 (1,2)	Резьба М6x0,75
СРТ-50-876ФВ			1,4				Резьба 0,25-36UNS-2А
СРТ-50-876ФВМ							Резьбы 0,25-36UNS-2А и М6x0,75

Таблица 10.2. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8		
Кабельные соединители вилка (В) и розетка (Р) ВРО 364 049 TV									
Кабельные соединители вилка (В) и розетка (Р) ВРО 364,039 TV									
СР-50-424ФВ прямая	III(В)	0-10	1,3	-	-40	Ø21,4х36,5 (44)	PK50-2-11; 16; 21;22		
СР-50-426ФВ прямая			-			Ø 21,4х36,5 (43)	PK50-3-11		
СР-50-434ФВ угловая			1,2			36х38,5 (63)	PK50-2-11; 16; 21;22		
СР-50-435ФВ угловая						36х38,5 (62)	PK50-3-11		
СР-50-425ФВ приборная прямая	III(Р)		1,4	-	-40	25,4х37,5 (47)	PK50-2-11, 16, 21;22		
СРТ-50-427ФВ приборно-кабельная						25,4х37,5 (45)	PK50-3-11		
СР-50-440ФВ приборная герметичная						Ø28х24 (37)	-		
Герметичные КМПП ВРО.364.039 TV									
СРТ-50-801ФВ	III(Р)	0 - 10	1,7	-	-60	Ø16х21,5 (12)	Резьба на корпусе М16х1		
СРТ-50-884ФВ									
Кабельные соединители вилка (В) и розетка (Р) (ВРО 364 015 TV)									
СР-50-275ФВ прямая	IX(Р)	0-9,5	2,2	-	-50	- (7,5)	PK50-2-11; 16; 21,22		
СР-50-276ФВ прямая			2,56			- (6,5)			
СР-50-281ФВ прямая	2,5								
СР-50-282ФВ прямая	3,5								
СР-50-287ФВ угловая	2,5		- (11,5)						
СР-50-288ФВ приборная прямая	3,5		- (3,0)						
СР-50-267ФВ приборная прямая	IX(В)					-			-
СР-50-268ФВ приборная прямая									

Цикл изготовления и поставки соединителей с приемкой 1 и 5 – 45 дней, с приемкой 9–60 дней. К сожалению, до настоящего времени нет сводного каталога соединителей, выпускаемых ФГУП ПО «Октябрь», с рекомендациями по их применению.

Выпуск КМПП СРГ-50-751ФВ и СРГ-50-876ФВ начат и в НПФ «Микран» [81]. КСВН пары этих соединителей вилка и розетка не превышает 1,2 в диапазоне частот 0–10 ГГц и 1,5 на частотах 10–18 ГГц. Кроме того, налажен выпуск кабельных сборок на основе отечественных (PK50-1,5-22С, PK50-2-25, PK5-4-27С и др.) и зарубежных (RG-174/U, RG-58/U и др.) кабелей. Кабели армированы на концах соединителями типов IX или III в различных сочетаниях. Кабельные сборки используют для монтажа радиоэлектронной аппаратуры, в антенно-фидерных трактах СВЧ-диапазона, в отечественной и зарубежной измерительной и испытательной аппаратуре [81].

### 10.2.2. Соединители ОАО ЦНИИИА

Измерительные соединители этого предприятия применяются в диапазоне частот до 50 ГГц (табл. 10.3). Они являются аналогами зарубежных соединителей SMA, APC-7, APC-3,5 и APC-2,4. Разработаны кабельные соединители типов III, IX, I, коаксиально-микрополосковые переходы в диапазоне частот 0–37,5 ГГц для 50-Омной МПЛ и адаптеры для обеспечения совместимости с отечественными и зарубежными соединителями. Соединители выпускаются как с резьбовым, так и с фланцевым соединением с корпусами изделий.

Максимальный КСВН пары КМПП с тестовой микрополосковой линией на подложке из поликора ( $\epsilon = 9,6$ ) определяется по формуле  $(1,12 + 0,006f)^2$ , где  $f$  – частота, ГГц [79]. Соединители СМА-3, СМА-4, и СМА-6 могут работать в расширенном диапазоне частот 0–18 ГГц, а СМА-5 – в диапазоне частот 0–26,5 ГГц, но при этом КСВН увеличивается до 1,5 в поддиапазонах частот 6,0–12,5 ГГц и 1–6,5 ГГц (для СМА-5). В остальных точках рабочего диапазона КСВН соответствует данной формуле.

Таблица 10.3. Соединители ОАО ЦНИИИА [2]

Обозначение соединителя	Тип (табл 10.1)	Рабочий диапазон частот, ГГц	Максимальный КСВН (диапазон частот, ГГц)	Прямые потери СВЧ, дБ (диапазон частот, ГГц)	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Особенности конструкции
Приборно-кабельные (ГОСТ 13317-89)						
СС 7-3f	III (P)	0-18	1,12	-	-	резьбовые
СС 7-3m	III (B)					фланцевые
СС 3,5-3f	3,5/1,52 (P)	0-34	1,20			фланцевые
СС 3,5-3m	3,5/1,52(B)					резьбовые
СС 2,4-f	I (P)	0-50	1,25 (0-26)			фланцевые
СС 2,4-m	I (B)		1,35 (0-50)			резьбовые

Таблица 10.3. Окончание

Обозначение соединителя	Тип (табл. 10.1)	Рабочий диапазон частот, ГГц	Максимальный КСВН (диапазон частот, ГГц)	Прямые потери СВЧ, дБ (диапазон частот, ГГц)	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Особенности конструкции
Переходы коаксиально-микрополосковые фланцевые (ГОСТ 13317-89)						
CMA-1	III (B,P) N (m,f)	0—12,5	$(1,12+0,006f)^2$	0,5 (0—12,5) 0,9 (12,5—15) 1,2 (15—18) 1,8 (18—26,5)	41×21×21 (B) 42×16×16 (P) (40)	подложка толщиной 0,5 и 1,0 мм
CMA-3		12—18			41×21×21 (B) 42×26×26 (P) (50)	подложка 0,5 мм
CMA-4					41×21×21 (B) 42×16×16 (P) (50)	подложка 1,0 мм
CMA-2	IX (B,P) 3,5/1,52 (P,B), SMA(m, f)	0—15			16,5×12×12(B) 12,5×12×12(P) (4)	подложка 0,5 и 1 мм
CMA-5		12 - 18			32×12×12 (B) 31×12×12 (P) (16)	подложка 0,5 мм
CMA-6					32×12×12 (B) 32×12×12 (P) (16)	
CMA-7	I(B,P) 2,4-мм (B,P)	12—26,5	$(1,12+0,006f)^2$ +0,15		23,5×14×18 (B) 23,6×14×18 (P) (24)	подложка 1,0 мм
CMA-8		0—15				подложка 0,5 и 1,0 мм
CMA-9		12—18				подложка 1,0 мм

КМПП CMA-7 и CMA-9 могут работать в расширенных диапазонах частот 0–37,5 и 0–18 ГГц соответственно, но при этом в поддиапазоне 0–7 ГГц максимальный КСВН пары переходов не превышает 1,5.

Максимальные прямые потери пары переходов всех типов с тестовой микрополосковой линией длиной 15 мм составляют 0,5 дБ в поддиапазонах частот 0–12,5 ГГц, 0,9 дБ (12,5–15) ГГц, 1,2 дБ (15–18) ГГц и 1,8 (18–26,5) ГГц.

### 10.2.3. Соединители ФГУП НИПИ «Кварц»

Создание соединителей с размерами коаксиальной линии 2,4×1,04 мм стало возможным благодаря разработке диэлектрической опорной шайбы, не резонирующей в диапазоне частот до 50 ГГц. Для снижения эффективной диэлектрической проницаемости шайба была изготовлена в виде диска с не-

заполненными симметричными полостями. Материал шайбы — поли-4-метилпентен-1 (темплен) [77].

Для повышения износостойкости гнездовой проводник (цанга) выполнен с четырьмя ламелями, утолщенными в месте контакта с ответным штырем. Покрытие проводника — золото с палладий-никелевым барьерным подслоем. Переходное сопротивление внутреннего проводника — 0,01 Ом.

ФГУП НИПИ «Кварц» разработал и выпускает широкую номенклатуру соединителей всех типов. Особый интерес представляют соединители типа I для диапазона частот 0–50 ГГц.

Соединители типа I, как и их зарубежные аналоги (2,4-мм соединители), выполнены с метрической резьбой М7х0,75 на корпусе и поэтому совместимы без применения адаптеров.

Параметры кабельных соединителей типа I розетка и вилка представлены в табл. 10.4.

**Таблица 10.4.** Параметры 1-мм кабельных соединителей ФГУП НИПИ «Кварц»

Обозначение соединителя	Тип (табл 10 1)	Максимальный КСВН* (в диапазоне частот, ГГц)	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Марка применяемого кабеля
2073	I (B)	1,4 (0 –12,4)	9,2×21 (12)	PK50-1,5-12
2074	I (P)		9×21,3 (10)	
2079	I (B)		9,2×20 (10)	PK50-2-16(21)
2080	I (P)		9×21 (10)	
2083 (фланцевый)			21×16×16(12)	
2081	I (P)	1,15+0,01f (0–40)	7,2×10 (10)	PK50-2-25(28, 29)
2075	I (B)		9×21 (10)	
2076 (фланцевый)	I (P)		21×16×16 (12)	
2077	I (P)	1,15+0,012f (0–50)	7×20 (10)	PK50-1,5-22
2082	I (B)		7×21 (10)	
2078 (фланцевый)	I (P)		21×16×16 (12)	
2084	I (B)	1,5+0,012 f (0–50)	9,2×8,5 (10)	PK50-1,5-216
2085	I (P)			

\*Величины КСВН кабельных соединителей даны на пару соединителей вилка и розетка

Соединители рассчитаны на работу в диапазоне температур –50 ... +70 °С и выдерживают без пробоя испытательное напряжение 500 В. Для канала 2,4/1,04 мм разработан радиочастотный кабель PK50-1,5-216 с диаметром центрального проводника 0,51 мм. Центральный проводник кабеля служит внутренним проводником кабельного соединителя вилка и непосредственно вставляется в гнездовой контакт соединителя розетка.

### 10.2.4. Соединители НПП «Спецкабель»

НПП «Спецкабель» производит широкую номенклатуру радиочастотных кабелей для систем радиосвязи, телевидения, радиоэлектронной, измерительной и испытательной аппаратуры. Наряду с этим предприятие ведет разработку в основном негерметичных радиочастотных соединителей, среди которых кабельные и приборно-кабельные, вилка и розетка, прямые и угловые (табл. 10.5).

**Таблица 10.5. Параметры соединителей НПП «Спецкабель»**

№ п/п	Наименование соединителя	Обозначение	Предельная частота, ГГц	Максимальный КСВН	Марка применяемого кабеля
Тип III (7/3,04. «Экспертиза»), N					
1	Вилка прямая кабельная	CP50-11-3-4-47	15	1,37	PK50-4-47
2	Вилка угловая кабельная	CP50-31-3-4-47			
3	Розетка приборно-кабельная	CP50-61-3-4-47			
4	Розетка приборно-кабельная фланцевая	CP50-41-3-3-28	18	1,33	PK50-3-28(29)
5	Вилка прямая кабельная	CP50-11-3-3-28		1,30	
6	Вилка прямая кабельная	CP50-11-3-5-41	12	1,4	PK50-5-41
7	Розетка приборно-кабельная	CP50-61-3-5-41			
8	Вилка прямая кабельная	CP50-11-3-7-35	3	1,25	PK50-7-35
9	Вилка прямая кабельная	CP50-11-3-2-213	18	1,37	PK50-2-213
10	Вилка кабельная	CP50-11-3-5-44		1,50	PK50-5-44
11	Розетка приборно-кабельная	CP50-61-3-5-44			
12	Вилка кабельная	CP50-11-3-9-44	10		PK50-9-44
13	Вилка приборно-кабельная герметичная	CPГ50-61-3-4-47	15	1,37	PK50-4-47
Тип IX (3,5/1,52, «Град») SMA					
14	Вилка прямая кабельная	CP50-11-9-4-47	15	1,25	PK50-4-47
15	Вилка прямая кабельная	CP50-11-9-3-28	26	1,30 (до 18 ГГц)	PK50-3-28(29)
16	Вилка прямая кабельная	CP50-11-9-2-213	18	1,3	PK50-2-213
17	Розетка прямая кабельная	CP50-22-9-2-215	0,1	Не нормирован	PK50-2-215
18	Розетка приборная	CP50-84-9-2-215			
19	Вилка прямая кабельная	CP50-12-9-2-215			
20	Вилка кабельная	CP50-12-9-4,8-32	14	1,3	PK50-4,8-32

Обозначение соединителей состоит из букв CP – соединитель радиочастотный или CPГ – соединитель радиочастотный герметичный, величины волнового сопротивления – 50 Ом. Через дефисы следуют первые две цифры, обозначающие тип соединителя и способ заделки кабеля. Расшифровка



первой цифры: 1 – вилка кабельная, 2 – розетка кабельная, 3 – вилка кабельная угловая, 4 – розетка приборно-кабельная фланцевая, 5 – вилка приборно-кабельная, 6 – розетка приборно-кабельная под гайку, 7 – вилка приборная, 8 – розетка приборная. Вторая цифра расшифровывается так: 1 – пайка, 2 – прижим, 3 – обжим, 4 – на плату, 5 – на полосок. Далее через дефис следует цифра 3 или 9 (тип соединителя, его присоединительный ряд согласно ГОСТ 13317-89). Последние три цифры обозначают марку радиочастотного кабеля.

НПП «Спецкабель» ограничивается разработкой и выпуском соединителей с предельной рабочей частотой 18 ГГц (исключение – вилка кабельная CP50-11-9-3-28 с предельной частотой 26,5 ГГц). Кроме того, предприятие выпускает серию кабельных сборок на основе отечественных и зарубежных гибких и полужестких кабелей. Кабель армирован на концах соединителями, типов III и IX (в соответствии с отечественными стандартами), а также типов N, BNC, TNC, SMA при различном сочетании соединителей. Диапазон рабочих частот таких сборок 0–18 ГГц, максимальный КСВН 1,2–1,4 в зависимости от типа соединителей и марки радиочастотного кабеля. Длина сборок – от 0,05 до 50 м. Сборки соответствуют требованиям стандарта МЭК 60966 1 издание 2, 1999 г. Они нашли применение в различных типах радиоизмерительной и испытательной аппаратуры, для связи фидерных кабелей и антенн, в базовых станциях сотовой связи и др.

Несомненным достижением НПП «Спецкабель» является разработка и выпуск соединителей, кабельных сборок и адаптеров, совместимых с зарубежными аналогами. По четкости и наглядности изложения материалов каталог продукции этой фирмы является одним из лучших не только среди отечественных, но и зарубежных аналогичных каталогов.

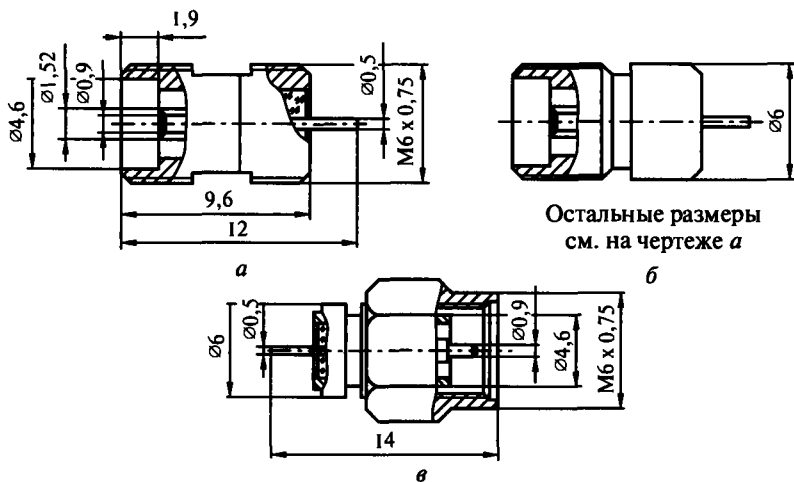


Рис. 10.3. КМПП TC2.236.072 (а), TC2.236.072-01 (б), TC2.236.074 (в)

### 10.2.5. Соединители ФГУП «НПП «Исток»

«ФГУП НПП «Исток» разрабатывает и выпускает мелкими сериями соединители измерительные и общего применения. В этом разделе будут рассмотрены только герметичные коаксиально-микрополосковые переходы.

В 1981 году по кооперации с ФГУП ПО «Октябрь» было начато производство коаксиально-микрополосковых переходов ТС2.236.061 (полный аналог СРГ50-751ФВ). Это было вызвано отсутствием в то время промышленного выпуска герметичных КМПП с рабочим диапазоном частот 0–18 ГГц.

Затем были разработаны оригинальные герметичные КМПП розетка (ТС2.236.072 и ТС2.236.072-01) и вилка (ТС2.236.074) с воздушной коаксиальной линией размерами 3,5/1,52 мм, имеющие предельную рабочую частоту 36 ГГц [23, 40]. Их конструкция показана на рис. 10.3, а внешний вид – на рис. 10.2, б–д. КМПП, показанный на рис. 10.2, г, выполнен с дюймовой резьбой 0,250-36UNS-2A на корпусе.

Параметры этих КМПП приведены в таблице 10.6.

**Таблица 10.6.** Параметры герметичных КМПП ФГУП «НПП «Исток»

Обозначение соединителя	Тип (табл. 10.1)	Рабочий диапазон частот, ГГц	Максимальный КСВН (в диапазоне частот, ГГц)	Прямые потери СВЧ, дБ, не более	Экранное затухание, дБ	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Особенности конструкции
ТС2.236.072 (ТС0.223.014ТУ)	3,5/1,52 (Р)	0–36	1,1 (0–10)	0,25	-90	Ø6х12 (1,2)	Резьбовое паяное соединение с корпусом
ТС2.236.072-01 (ТС0.223.014ТУ)			1,25 (10–18) 1,4 (18–36)				Безрезьбовое паяное соединение с корпусом
ТС2.236.074 (ТС0.223.020ТУ)	3,5/1,52 (В)		1,15 (0–10) 1,30 (10–18) 1,43 (18–36)	0,30	-90	9,2х14 (2,4)	Безрезьбовое паяное соединение с корпусом
КРПГ434511.004-03 с вводом КРПГ433434.015-03 (d = 0,5 мм)	IX (Р)	0–18	1,2 (0–10) 1,35 (10–18)	0,30	-60	10,8х16 (2)	Составной соединитель

КМПП сконструированы без применения органических материалов. Это позволило повысить их радиационную стойкость, а также допустимую температуру кратковременного нагрева до 340°C при пайке в корпуса изделий. Корпус и центральный проводник покрыты износостойким сплавом золото-кобальт, внутренний гнездовой проводник – сплавом палладий-никель.

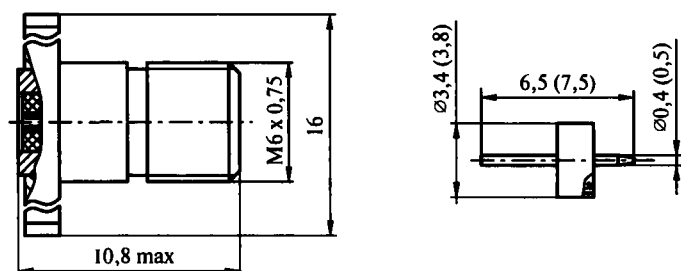


Рис. 10.4. КМПП КРПГ.434511.004 с СВЧ-вводом

На рисунке 10.4 показана конструкция, а на рисунке 10.2, *е* – внешний вид составного коаксиально-микрополоскового перехода КРПГ.434511.004 с СВЧ-вводом КРПГ.433434.015.

Внутренний проводник составного соединителя образуется при введении центрального проводника СВЧ-ввода в гнездовой контакт соединителя. После этого фланец соединителя прикручивают двумя винтами к корпусу изделия (толщина стенки корпуса должна быть не менее 3,2 мм). СВЧ- вводы выполнены с диаметром центрального проводника (*d*) 0,4 и 0,5 мм. Вводы с диаметром проводника 0,4 мм предназначены для преимущественного применения на частотах 12–18 ГГц. Параметры составных КМПП приведены в табл. 10.6.

В 2005 году были созданы коаксиально-микрополосковые переходы КРПГ.434511.015 (тип IX, розетка, ГОСТ 20265-83) и КРПГ.434511.016 (тип III, розетка, ГОСТ 20265-83) [82]. Первый из них – аналог СРГ50-751ФВ. Компьютерный расчет параметров и выбор оптимальной конструкции КМПП был выполнен по программе Microwave Studio. Внешний вид этих КМПП показан на рисунке 10.5.

#### Параметры КМПП

	КРПГ.434511.015	КРПГ.434511.016
Волновое сопротивление, Ом.....	50	50
Рабочий диапазон частот, ГГц.....	0–18	0–18
Максимальный КСВН в рабочем диапазоне частот.....	1,25	1,30
Прямые потери СВЧ, дБ.....	0,2	0,3
Экранное затухание, дБ, менее.....	–60	–60
Герметичность (скорость натекания), м <sup>3</sup> ·Па/с.....	1,3·10 <sup>–11</sup>	1,3·10 <sup>–11</sup>
Допустимое количество соединений и рассоединений, не менее.....	250	250
Минимальная наработка на отказ, час.....	12000	12000
Срок сохраняемости, лет.....	15	15

Предусмотрены варианты конструкций этих КМПП экспортного исполнения с резьбой на корпусе розетки и на присоединительной гайке вилки соответственно 0,250-36UNS-2A и 0,625-24UNEF-2A.



# Спецкабель

СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ  
РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

РАДИОЧАСТОТНЫЕ  
КОАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

ПЕРЕХОДЫ КОАКСИАЛЬНЫЕ

ПЕРЕХОДЫ КОАКСИАЛЬНЫЕ ГЕРМЕТИЧНЫЕ

КАБЕЛЬНЫЕ СБОРКИ

Гибкие,  
подушковые,  
жесткие

По техническому  
заказу  
заказчика

Научно-производственное предприятие "Спецкабель"

107014, г. Москва, ул. Стромвынка, д.13  
Тел: (495) 101-41-99 (многоканальный), 263-3406,  
013-12-24, 263-0353

e-mail: [info@spcable.ru](mailto:info@spcable.ru)  
<http://www.spcable.ru>

нам 10 лет

# ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА ТЕХНОЛОГИЯ БИЗНЕС

Журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Техналогия, Бизнес" издается с 1996 года.

Издатель РИЦ "ТЕХНОСФЕРА".

Принадлежность с 2003 года – 8 номеров в год. Тираж 17 тыс. экземпляров.

Среди многочисленных изданий по электронике журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ"

занимает особое место. Это единственный в России журнал, свыше

двадцати рубрик которого посвящены проблемам всей электроники

в целом – от электронных компонентов до вычислительной техники

и радиоэлектронных систем различного назначения,

а также вопросы экономики и бизнеса.

Журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ" выступает информационным

спонсором и активно участвует в отечественных и международных

выставках и форумах по связи, информатике

и другим направлениям электроники.

## подписка

- по каталогу "Газеты и журналы" агентства "Роспечать", индекс: 71775 – полугодовой индекс 47290 – годовой индекс
- в объединенном каталоге "Пресса России" 26037 – полугодовой индекс
- в ООО "Вся пресса" по тел.: (495) 257-9980
- в редакции журнала по тел.: (495) 234-0110



# ПЕЧАТНЫЙ МОНТАЖ

Новое издание издательского дома "Техносфера" –

журнал "ПЕЧАТНЫЙ МОНТАЖ"

Рассчитан на специалистов в сфере высоких технологий и электроники

Распространяется по подписке

(с журналом ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ) по всей России, странам СНГ, на выставках, семинарах и презентациях.

На 2006 год можно оформить бесплатную подписку.

Тираж 4 000 экз.

Аудитория: от 20 до 50 лет, руководители, специалисты, научные работники, преподаватели технических ВУЗов и др



Для писем: 125319, Москва, а/я 594, ЗАО "РИЦ "ТЕХНОСФЕРА"

Тел.: (495) 234-0110 Факс: (495) 956-3346

E-mail: [journal@electronics.ru](mailto:journal@electronics.ru) [Http://www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)

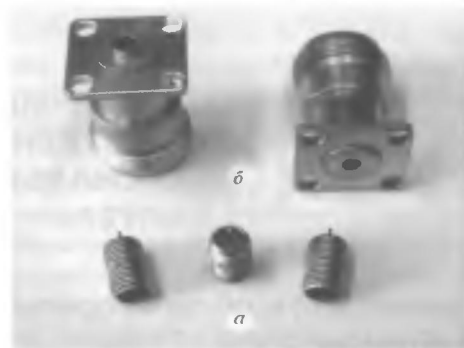


Рис. 10.5. Внешний вид КМПП КРПГ.434511.015 (а) и КРПГ. 511.016 (б)

Все разработанные КМПП выдерживают воздействие следующих механических и климатических факторов [23]:

- вибрации с ускорением 10 g, диапазон частот 10–2000 Гц, время испытаний – 48 ч,
- одиночных ударов с ускорением 60 g, длительностью 2–6 мс, число ударов – 3,
- многократных ударов с ускорением 40 g, длительностью 2–6 мс, число ударов – 1000,
- линейного ускорения – 50 g, время действия – 35 с,
- акустического шума с уровнем звукового давления 145–160 дБ,
- повышенной (+85°C) и пониженной (–60°C) температуры среды, время выдержки – 30 мин,
- изменения температуры среды от +125 до –60°C, количество циклов 5,
- повышенной влажности воздуха (93±3)% при температуре среды (40±2)°C в течение 21 суток,
- пониженного атмосферного давления – 6,7 ГПа (5 мм рт. ст.),
- повышенного атмосферного давления – не менее 3 атм.

Допустимо применение КМПП в изделиях при иных параметрах воздействующих факторов в случае удовлетворительных результатов испытаний КМПП, проведенных потребителем в составе изделия.

В качестве ответной кабельной вилки для всех КМПП розетка канала 3,5/1,52 мм можно использовать стандартные кабельные вилки, выпускаемые ФГУП ПО «Октябрь», например, СР-50-724 ФВ, СР-50-726 ФВ и др. Для КМПП КРПГ.434511.016 подходят кабельные вилки СР-50-424 ФВ, СР-50-426 ФВ и других аналогичных типов.

По комплексу параметров разработанные коаксиально-микрополосковые переходы соответствуют зарубежным аналогам.

## ЗАРУБЕЖНЫЕ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ АДАПТЕРЫ

### 11.1. Назначение и область применения адаптеров

Переходное устройство с различным сочетанием разъемов розетка и вилка для одного или разных сечений коаксиального канала называют адаптером (adapter), а также переходом, переходником. Коаксиальные устройства широко используются в стационарной и бортовой радиоэлектронной аппаратуре народного хозяйственного, научного и военного назначения: передающей, приемной, измерительной, контрольной и испытательной. Неотъемлемыми элементами этой аппаратуры являются коаксиальные соединители, кабельные сборки и адаптеры.

Из-за несоответствия видов резьбы (дюймовая — у зарубежных, метрическая — у отечественных соединителей) без адаптеров нельзя присоединить зарубежные кабельные сборки к отечественной аппаратуре, а отечественные — к зарубежной.

Адаптеры применяют для электрической связи радиотехнических устройств, имеющих на выходе соединители в случаях, когда эти соединители отличаются друг от друга:

1. размерами коаксиального канала.
2. типом разъема: розетка или вилка.
3. способом соединения с ответной частью: резьбовое, байонетное, защелкиванием или униполярное.
4. видом резьбы на корпусе: метрическая или дюймовая.

Кроме того, адаптеры применяют для предохранения выходных соединителей от износа и поломки в процессе настройки радиотехнического устройства, если требуются многократные соединения и рассоединения устройства.

Набор адаптеров одного сечения канала называют одноканальными (in-series adapters), разных сечений — межканальными (between-series adapters). Наиболее широко применяют адаптеры для канала 4,1/1,27 мм с фторопластовым заполнением — SMA in-series adapters, SMA-adapters.

При обозначении адаптера обязательно указывают тип его разъемов:

- розетка-розетка, гнездо-гнездо (p-p, f-f) (jack-jack, female-female),
- вилка-вилка, штырь-штырь (v-v, m-m) (plug-plug, male-male),

- розетка-вилка, гнездо-штырь (р-в, г-ш) (jack-plug, female-male).

Конструктивно адаптеры подразделяются на прямые (straight) и угловые (right angle), проходные (feedthrough) для установки в панель (bulkhead) с резьбовым или паяным соединением с ней, а также герметичные и негерметичные.

Большинство фирм — производителей коаксиальных соединителей одновременно разрабатывают и выпускают соответствующие им адаптеры. К настоящему времени разработано большое число типов и модификаций адаптеров. Если количество основных типов соединителей исчисляется десятками, то количество совместимых с ними адаптеров уже насчитывает сотни наименований. Рассмотреть все типы зарубежных адаптеров не представляется возможным, поэтому ограничимся обзором наиболее широко применяемых одноканальных SMA-адаптеров. Более подробно будут рассмотрены отечественные адаптеры типов I, III и IX, ГОСТ 13317-89 и ГОСТ 20265-83.

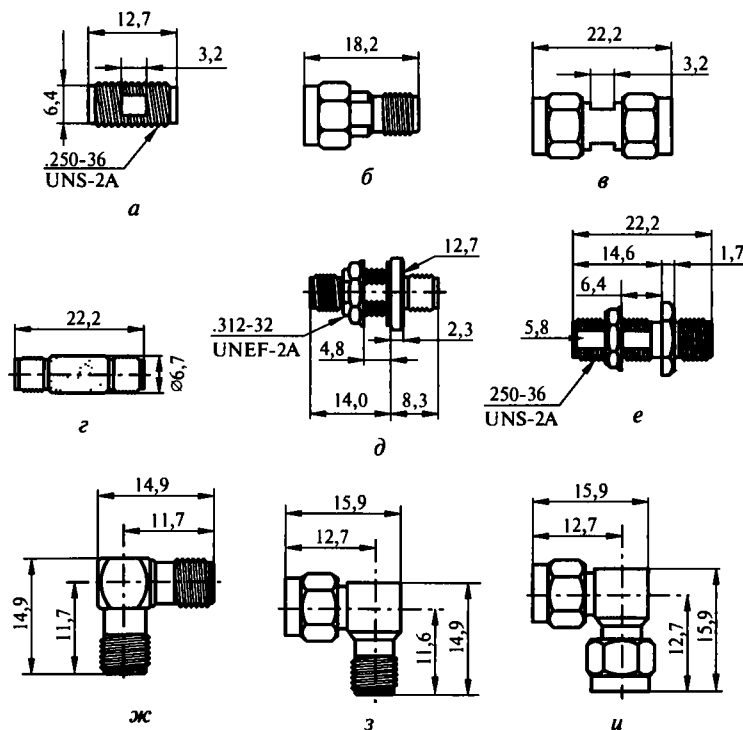


Рис. 11.1. Одноканальные адаптеры: (а) р-р; (б) р-в; (в) в-в; (г) р-р, накатка на корпусе, (д) р-р, панельный, герметичный; (е) р-р, панельный; (ж) р-р, угловой; (з) р-в, угловой; (и) в-в, угловой



## 11.2. Зарубежные SMA in-series-адаптеры

Общий вид и основные геометрические размеры зарубежных адаптеров приведены на рисунке 11.1, *а–и*. По используемым материалам и покрытиям корпуса адаптеры делятся на 4 категории:

1. Корпус из нержавеющей стали с золотым износостойким покрытием толщиной 1,3–2,5 мкм.
2. Корпус из нержавеющей стали с пассивированной поверхностью.
3. Корпус из бериллиевой бронзы с золотым покрытием.
4. Корпус из латуни с никелевым покрытием (адаптеры низкой стоимости).

SMA-адаптеры имеют дюймовую резьбу в соответствии со стандартом ANSI B1.1-1982: на корпусе розетки – 0.250-36UNS-2A, на присоединительной гайке вилки – 0.250-36UNS-2B. Наружный диаметр такой резьбы с припуском – 6,35 мм (фактический – 6,2 мм), а ее шаг – 0,706 мм. Внутренний проводник адаптеров всех категорий изготавливают из термически упрочненной бериллиевой бронзы и покрывают золотом толщиной 1,3–2,5 мкм. В качестве диэлектрика используют фторопласт.

Основные типы и категории адаптеров зарубежных фирм, а также величина их КСВН в заданном диапазоне частот приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1. SMA-адаптеры ведущих зарубежных фирм

Фирменное обозначение адаптера	Особенности конструкции ( <i>а–и</i> см. рис. 11.1)	Категория	Максимальный КСВН (в диапазоне частот, ГГц)
1	2	3	4
AMPHENOL (США) [52,58]			
901- 9217	р–р, прямой ( <i>а</i> )	1	1,14 (0–18)
901- 9216	р–в, прямой ( <i>б</i> )		
901- 9218	в–в, прямой ( <i>в</i> )	1	1,14 (0–18)
901- 9209-А	р–р, проходной, панельный ( <i>е</i> )		
901- 9219-А	р–в, угловой ( <i>з</i> )		
901- 274	в–в, угловой ( <i>и</i> )	3	1,23 (0–18)
M/A-COM OMNI-SPECTRA, США [18,42]			
2080-0000-00	р–р, прямой ( <i>а</i> )	1	1,14 (0–18)
2082-5133-00	р–в, прямой ( <i>б</i> )		
2081-0000-00	в–в, прямой ( <i>в</i> )		
2080-5055-00	р–р, прямой, накатка на корпусе ( <i>з</i> )		
2084-1100-00	р–р, проходной, панельный, герметичный ( <i>д</i> )		
2084-0000-00	р–р, проходной, панельный ( <i>е</i> )		1,23 (0–18)
2086-1230-00	р–р, угловой ( <i>ж</i> )		
2088-5013-00	р–в, угловой ( <i>з</i> )		
2087-1230-00	в–в, угловой ( <i>и</i> )		
NARDA MICROWAVE, США [85]			
Модель 59	р–р, прямой ( <i>а</i> )	1	1,25 (0–18)
Модель 60В	в–в, прямой ( <i>в</i> )		
Модель 61В	р–в, прямой ( <i>б</i> )		

Таблица 11.1. Окончание

Фирменное обозначение адаптера	Особенности конструкции (а–и см. рис. 11.1)	Категория	Максимальный КСВН (в диапазоне частот, ГГц)
TYCO (AMP) [32,49]			
221643-1	р–р, проходной, панельный (е)	2	1,23 (0–18)
228496-1	р–р, проходной, панельный (д)	4	1,31 (0–26,5)
228497-1	р–р, проходной, панельный (е)		
221639-1	в–в, прямой (е)	2	
LUCAS WEINSCHL [84]			
Модель 1587	р–р, прямой (а)	3	1,20 (0– 26,5)
Модель 1588	р–в, прямой (б)		
Модель 1589	в–в, прямой (е)		
AGILENT (HEWLETT – PACKARD) [69,70]			
HP-1250-1462	р–в, прямой (б)	1	1,14 (0–18) 1,23 (0–26,5)
HP-1250-1158	р–р, прямой (а)		
HP-1250-1159	в–в, прямой (е)		
HP-1250-1249	р–в, угловой (з)		
HP-1250-1397	в–в, угловой (и)		
SPECTRUM ELEKTROTECHNIK [53]			
8001-2121-00	р–р, прямой (а)	1	1,25 (0,5–18)
8001-1121-00	р–в, прямой (е)		
8001-1111-00	в–в, прямой (б)		
RADIAL, ФРАНЦИЯ [22,55]			
R125705	р–р, прямой (а)	1	1,23 (0–18)
R125704	р–в, прямой (б)		
R125703	в–в, прямой (е)		
R125720	р–р, проходной, панельный (е)	2	1,28 (0–18)
R125771		1	
R125771-01	р–в, угловой (з)	2	
KMW [54]			
51111-1120-A	р – р, прямой, проходной, панельный (е)	1	1,15 (0–18)
51111-0010-A	в – в, прямой (е)		
ROSENBERGER [57]			
32K101-K00D3	р–р, прямой (а)	1	1,14 (0–18)
32K121-K00S3		2	
32S105-K00D3	р–в, прямой (б)	1	
32S125-K00S3		2	
32S103-S00D3	в–в, прямой (е)	1	1,30 (0 - 18)
32S123-S00S3		2	
32K101-KH0D3	р–р, проходной, панельный, толщина панели 4,8 мм (е)	1	
32K121-KH0S3		2	
32K601-K00D3	р–р, панельный, толщина панели 6,4 мм (е)	1	1,25 (0–6)
32K621-K00S3		2	
32K201-K00D3	р–р, угловой (ж)	1	
32K221-K0DS3		2	
32S201-K00D3	р–в, угловой (з)	1	
32S221-K0DS3		2	

SMA-адаптеры предназначены для работы в частотном диапазоне 0–26,5 ГГц. Однако для большей части серийно выпускаемых адаптеров рекомендуемый рабочий диапазон частот 0–18 ГГц. Типичная частотная зависимость КСВН прямых адаптеров приведена на рисунке 11.2 [85].

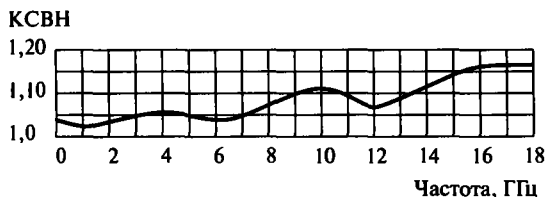


Рис. 11.2. Частотная зависимость КСВН прямых адаптеров

Однотипные адаптеры (так же, как и другие соединители) зарубежных фирм выпускаются в основном двух категорий: первой и второй. Обозначение адаптеров категории 1 фирм M/A - COM и SPECTRUM ELEKTROTECHNIK заканчивается цифрами 00. Для категории 2 эти цифры в обозначении заменяются на 02. Фирма AMPHENOL при обозначении адаптеров 2-й категории добавляет буквы SF. В обозначении адаптеров фирмы KMW окончание A означает золотое покрытие (1-я категория), а P — пассивированная поверхность корпуса (2-я категория). Фирма ROSENBERGER применяет более сложную систему обозначения (см. табл. 11.1).

Некоторые фирмы (AMP, LUCAS WEINSCHEL и др.) выпускают и более дешевые адаптеры 3-й и 4-й категорий.

В ассортименте зарубежных фирм преобладают прямые адаптеры. Более сложные в изготовлении угловые адаптеры выпускают менее половины упомянутых фирм.

Лучшие параметры и наиболее высокую надежность имеют адаптеры, разработанные для применения в сложной и дорогостоящей измерительной аппаратуре (скалярные и векторные анализаторы спектра и др.). Такие адаптеры выпускают фирмы M/A — COM, AMPHENOL, AGILENT (HEWLETT-PACKARD), ROSENBERGER, LUCAS WEINSCHEL. Последняя из этих фирм создала серию оригинальных (патент США 4.431.255) адаптеров повышенной надежности. Они имеют низкий уровень потерь СВЧ: менее 0,25 дБ в диапазоне частот 0—18 ГГц и менее 0,35 дБ на частотах 18—26,5 ГГц.

К адаптерам для измерительной аппаратуры не предъявляется требование герметичности. Герметичные адаптеры для применения в герметизированных устройствах СВЧ предлагает, например, фирма M/A-COM.

Следует подчеркнуть, что адаптеры, выпускаемые разными зарубежными фирмами, имеют высокое качество исполнения и близки по своим параметрам.

#### Параметры зарубежных SMA-адаптеров

Волновое сопротивление, Ом .....	50
Рабочий диапазон частот, ГГц .....	0—18
КСВН адаптеров .....	$1,05 + 0,005 f_{\text{ГГц}}$ прямых
	$1,05 + 0,01 f_{\text{ГГц}}$ угловых
	$1,1 + 0,01 f_{\text{ГГц}}$ герметичных
Экранное затухание, дБ .....	$-(100 - f_{\text{ГГц}})$
Рабочее напряжение, В .....	350

Сопrotивление изоляции, Ом .....  $5 \cdot 10^9$   
 Сопrotивление центрального  
 проводника, Ом, ..... 0,03  
 Гарантированное количество соединений-рассоединений..... 500

Требования к воздействию механических и климатических факторов регламентируются стандартом MIL-C-39012.

### 11.3. Отечественные адаптеры

Отечественными предприятиями разработана и выпускается достаточно широкая номенклатура адаптеров – (табл. 11.2–11.4).

**Таблица 11.2. Одноканальные адаптеры типов IX (ГОСТ 13317-89 и ГОСТ 20265-83) и SMA (МЭК 61169-1)**

Обозначение адаптера	Вид разъемов, особенности конструкции	Габаритные размеры, мм		Масса, г	Максимальный КСВн (в диапазоне частот, ГГц)
		диаметр (сторона)	длина		
ОАО ЦНИИИА, г. Саратов [2]					
СА-5 (РК1-6) прямой	в-в SMA(m)-SMA(m),	9,0	16	5	1,20 (0-12) 1,25 (12-18) 1,50 (18-26)
СА-6 (РК1-5) прямой	р-р SMA(f)-SMA(f),	9,2	23	7	
ФГУП «НПП «ИСТОК», г. Фрязино [83]					
РеМЗ 562.529	в(А)-в(А), прямой	14×14	21,8	менее 8	1,2 (0-12) 1,4 (12-18)
РеМЗ.562.530	в(А)-в, прямой		23,2		
РеМЗ.562.531	в(А)-р(А), прямой		22,5		
РеМЗ 562.532	р-в(А), прямой		21,8		
РеМЗ 562.533	р(А)-р(А), прямой		22,5		
РеМЗ.562.534	р(А)-в(А), прямой		22,5		
РеМЗ.562.535	р(А)-р, прямой		23,2		
КРПГ 468562 024 (рис. 11.3)	р-р, панельный, герметичный	6	18	2,5	1,35 (0-18)
ФГУП НИПИ «КВАРЦ», г. Нижний Новгород [78]					
2.236.481	р-р, прямой	9,2×8	24,3	6	1,20 (0-12,05) 1,25 (0-18)
2.236.482	в-в, прямой	10	28	11	
2.236.483	в-в, угловой	18,6×8	17	9	
2.236.479	р-р, угловой	15×7	15	5	
2.236.478	в-р, угловой	16×8	16	7	
ФГУП ПО «ОКТЯБРЬ», г. Каменск - Уральский					
СР-50-728ФВ ВРО 364 049ТУ	г-г	12,5	19,5	5	1,2 (0,5-4,0) 1,4 (4,0-10) 1,8 (14-18)
СР-50-271ФВ ВРО 364.015ТУ	в-в	-	-	3	1,6 (0-3)

Таблица 11.2. Окончание

Обозначение адаптера	Вид разъемов, особенности конструкции	Габаритные размеры, мм		Масса, г	Максимальный КСВн (в диапазоне частот, ГГц)
		диаметр (сторона)	длина		
НПП «СПЕЦКАБЕЛЬ» [80]					
Прецизионные прямые адаптеры для частотного диапазона 0–26 ГГц.	В–В	-	-	-	1,15 (0–18)
	В–SMA(m)				
	SMA(m)–SMA(m)				
	Р–Р				
	Р–SMA (f)				
	SMA (f)–SMA (f)				
	В–Р				
	В–SMA (f)				
	SMA(m)–SMA (f)				
Герметичный (г)	Р(2)–Р(2) SMA(Рг)–SMA(Рг)	-	-	-	1,3 (0–18)

**Примечания:**

- Адаптеры серии РеМЗ разработаны под руководством К.В. Юрьева. (А) означает наличие американской дюймовой резьбы со стороны розетки или вилки.
- Адаптеры 2.236.4812. и 2.236.482 обеспечивают до 5000 соединений–рассоединений. Их предельная частота 26 ГГц.

Внешний вид адаптера КРПГ.468562.024 показан на рис. 11.3.



Рис. 11.3. Адаптер КРПГ.468562.024

Таблица 11.3. Одноканальные адаптеры типов I и III (ГОСТ 13317-89), 2,4–мм и N (МЭК61169-1)

Обозначение адаптера	Вид разъемов	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Рабочий диапазон частот, ГГц	КСВн пары адаптеров (в диапазоне частот, ГГц)	Примечание
ФГУП НИПИ «КВАРЦ», г. Нижний Новгород [77,78]					
2.236.461	IIIв–IIIв	Ø21,5×38,5 (64)	0–18	1,15 (до 6) 1,25 (до 12,05) 1,40 (до 18)	Гар. число сочленений 5000
2 236.462	IIIр–IIIр	Ø16×34 (45)			
434 542.025	N(f)–N(f)	Ø16×41,5 (30)		1,12 (0–12,4) 1,20 (12,4–18)	-
434 542.026	N(m)–N(m)	Ø21,5×41,5 (42)			

Таблица 11.3. Окончание

Обозначение адаптера	Вид разъемов	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Рабочий диапазон частот, ГГц	КСВН пары адаптеров (в диапазоне частот, ГГц)	Примечание
434.542 015	2,4(f)–2,4(f)	Ø9,5×31,5 (14)	0–50	1,17 (0–40)	-
434.542 016	2,4(m)–2,4(m)	Ø9,0×24,5 (9)		1,23 (40–50)	
2061	Iв–Iв	Ø9,2×31,5 (19)	0–50	1,35 (0–40)	
2060	Iр–Iр	Ø9,0×24,5 (14)		1,45 (40–50)	
2071	Iв–Iв	31×30×10,5 (32)	0–26,5	1,4	Угловые
2072	Iр–Iр	24,4×23,4×10,5 (24)		1,4 (для одного перехода)	
2070	Iв–Iр	31×23,4×10,5 (30)			
ОАО «СПЕЦКАБЕЛЬ» [80]					
Прецизионные прямые адаптеры	IIIв–IIIв	-	0–18	1,2 (0–18)	-
	N(m)–N(m)				
	IIIв–N(m)				
	IIIр–IIIр				
	IIIр–N(f)				
N(f)–N(f)	1,25 (0–18)				
Герметичный (г)		IIIрг–IIIрг			
	N(m)г–N(m)г				
НПФ «МИКРАН» [81]					
ПК1-18-01-01	IIIв–IIIв	-	0–18	1,2 (0–18)	-
ПК1-18-01-11	IIв–N(m)				
ПК1-18-11-11	N(m)–N(m)				
ПК1-18-01Р-01Р	IIIр–IIIр	-	0–18	1,2 (0–18)	-
ПК1-18-01Р-11Р	IIIр–N(f)				
ПК1-18-11Р-11Р	N(f)–N(f)				
ФГУП ПО «ОКТЯБРЬ», г. Каменск-Уральский (ВРО 364 039 ТУ)					
СР-50-441 ФВ	IIIр–IIIр	25,4×32 (41)	0–10	-	-
СР-50-442 ФВ	IIIр–IIIр	Ø28×33 (50)			Герметичный
ОАО ЦНИИИА [2]					
СА-15	Iв–Iв 2,4-мм(м)– 2,4-мм (м)	Ø11×19 (58)	0–50	1,25 (0–37,5) 1,30 (37,5–50)	-
СА-16	Iр–Iр 2,4-мм(f)– 2,4-мм(f)	Ø7×16,6 (58)	0–50	1,25 (0–37,5) 1,30 (37,5–50)	-
СА-17	Iв–Iр 2,4-мм(м)– 2,4-мм(f)	36,5×36,5×12,5 (85)	0–50	1,35 (0–37,5) 1,40 (37,5–50)	Угловые
СА-18	Iв–Iв 2,4-мм(м)– 2,4-мм (м)	36,5×36,5×12,5 (80)			
СА-19	Iр–Iр 2,4-мм(f)– 2,4-мм(f)	36,5×36,6×12,5 (75)			

Таблица 11.4. Межканальные адаптеры типов IX, III, I (ГОСТ 13317-89), SMA, N и 2,4-мм (МЭК61169-1)

Обозначение адаптера	Вид разъемов	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Рабочий диапазон частот, ГГц	КСВН пары адаптеров (в диапазоне частот, ГГц)	Примечание
ФГУП НИПИ «КВАРЦ», г. Нижний Новгород [77,78]					
2 236 487		Ø21,5×41,5 (42)	0–18	1,15 (0–7) 1,25 (7–18)	Гарантируемое число сочленений 5000
2 236.486	IX p - III p	Ø16×41,5 (30)			
2 236 486	IX p - III в	Ø21,5×40,5 (40)			
2 236.486	IX в - III p	Ø16 5×42,5 (32)			
434 542.032	N (f)–SMA(f)	Ø16×41,5 (30)	0–18	1,10 (0–7) 1,12 (7–18)	-
434 542.030	N(m)–SMA(m)	Ø21 5×40,5 (40)			
434 542.032	N (f)–SMA(m)	Ø16.5×42,5 (32)			
434.542.032	N(m)–SMA(f)	Ø21 5×41,5 (40)			
2066	I в - III в	Ø21 5×43,5 (50)	0–18	1,3 (0–18)	-
2067	I p - III p	Ø16×15,2 (37)			
2068	I p - III в	Ø21,5×44 (48)			
2069	I в - III p	Ø16×44,6 (34)			
2064	I в - IX в	Ø10×31 (14)	0–26,5	1,35 (0–26,5)	-
2062	I p - IX p	Ø9,2×23,4 (8)			
2065	I в - IX p	Ø9,2×30 (12)			
2063	I p - IX в	Ø10×24 (10)			
2015	N(m)–I p	Ø19×44	0–18	1,15 (0–18)	КСВН одного перехода
2016	N(m)–I в	Ø19×43,5			
2017	N (f)–I в	Ø16×44,6			
2018	N (f)–I p	Ø16×45,15			
2027	SMA(m)–I p	Ø10×24	0–26,5	1,18 (0–26,5)	-
2028	SMA(m)–I в	Ø10×31			
2029	SMA(f)–I в	Ø9,5×30			
2030	SMA(f)–I p	Ø9×23,4	0–26,5	1,18 (0–26,5)	-
ОАО ЦНИИИА, г. Саратов [2, 79]					
CA-1 (PK 1-1)	III в - IX в N(m)- SMA(m)	Ø21,5×41,5 (42)	0–18	1,15 (0–7) 1,25 (7–18)	-
CA-2 (PK1-2)	III в - IX p N(m)- SMA(f)	Ø21,5×40,5 (40)			
CA-3 (PK1-3)	III p - IX p N (f) - SMA(f)	Ø16×41,5 (35)			
CA-4 (PK1-4)	III p - IX в N (f)-SMA(m)	Ø16×42,5 (35)			
CA-7	III в - I в N(m)-2,4-мм(m)	Ø22×48,5 (135)	0–18	1,3	-

Таблица 11.4. Продолжение

Обозначение адаптера	Вид разъемов	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Рабочий диапазон частот, ГГц	КСВН пары адаптеров (в диапазоне частот, ГГц)	Примечание	
CA-8	III в – I p N(m)-2,4-мм(f)	Ø22×48,5 (123)				
CA-9	III p – I p N(f)-2,4-мм(f)	Ø16×49,5 (116)				
CA-10	III p – I в N(f)-2,4-мм(m)	Ø16×49,5 (125)				
CA-11	IX в – I в APC-3,5(m)-2,4-мм(m)	Ø11×38,35 (31)	0–37,5	1,3 (0–26,5) 1,4 (26,5–37,5)	-	
CA-12	IX в – I p APC-3,5(m)-2,4-мм(f)	Ø11×28,4 (26)				
CA-13	IX p – I p APC-3,5(f)-2,4-мм(f)	Ø10×36,8 (14)				
CA-14	IX p – I в APC-3,5(f)-2,4-мм(m)	Ø10×26,75 (18)				
НПП «СПЕЦКАБЕЛЬ» [80]						
-	IX в–III в	-	0–18	1,20	-	
	III в–SMA(m)					
	N(m)–IX в					
	N(m)–SMA(m)					
-	IX p–III p	-	0–18	1,20	-	
	III p–SMA(f)					
	N (f)–IX p					
	N (f)–SMA(f)					
-	III в–IX p	-	0–18	1,20	-	
	III в–IX p					
	III в–SMA(f)					
	N(m)–SMA(f)					
-	III p–IX в	-	0–18	1,20	-	
	III p–SMA(m)					
	N (f)–IX в		0–18	1,30		Герметич- ные
	N (f)–SMA(m)					
	III p(r)–IX p(r)					
	N(f)r–SMA(f) r					
НПФ «МИКРАН» [81]						
ПК2-18-01-03	IX в–III в	-	0–18	1,35	-	
ПК2-18-11-13	N(m)–SMA(m)					
ПК2-18-01-13	III в–SMA(m)					
ПК2-18-11-03	N(m)–IX в					
ПК2-18-01P-03	III p–IX в			1,35	-	
ПК2-18-11P-13	N (f)–SMA(m)					
ПК2-18-01P-13	III p–SMA(m)					
ПК2-18-11P-03	N (f)–IX в					



Таблица 11.4. Окончание

Обозначение адаптера	Вид разъемов	Габаритные размеры, мм (масса, г)	Рабочий диапазон частот, ГГц	КСВН пары адаптеров (в диапазоне частот, ГГц)	Примечание
ПК2-18-01-03Р	III в-IX р	-	0-18	1,35	-
ПК2-18-11-13Р	N(m)-SMA(f)				
ПК2-18-01-13Р	III в-SMA(f)				
ПК2-18-11-03Р	N(m)-IX р				

**Примечание.** В обозначении адаптеров НПФ «Микран»: ПК – переход коаксиальный, следующая цифра означает 1 – воздушный, 2 – негерметичный. Далее следует число 18 – предельная частота, ГГц. Последующие две пары цифр символизируют типы разъемов на концах адаптера: 01 – тип III, вариант 1, вилка; 01Р – тип III, вариант 1, розетка; 02 – тип IX, вариант 1, вилка; 02Р – тип IX, вариант 1, розетка; 03 – тип III, вариант 3, вилка; 03Р – тип III, вариант 3, розетка; 11 – тип III, вариант 3, вилка (N тип); 11Р – тип III, вариант 3, розетка (N тип); 13 – тип 3,5 мм, вилка, резьба дюймовая; 13Р – тип 3,5 мм, розетка, резьба дюймовая

Корпуса отечественных адаптеров, как правило, не покрывают золотом. Внутренний проводник изготавливают из термически упрочненной бериллиевой бронзы и покрывают золотом, сплавом серебро-сурьма или сплавами никеля.

В нашей стране выпускается достаточно широкий ассортимент адаптеров. Однако большинство из них по своим параметрам уступает зарубежным аналогам.

## НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВВОДЫ И ИЗОЛЯ- ЦИОННЫЕ СТОЙКИ

Низкочастотные вводы (НЧ-вводы) предназначены для ввода напряжений питания и низкочастотных сигналов в изделия микроэлектроники СВЧ. Изоляционные стойки обеспечивают вибропрочность внутренних соединений элементов изделия. Основные требования к этим радиокомпонентам — герметичность и миниатюрность.

Низкочастотные вводы могут быть изготовлены в металлокерамическом, металлоглазурном и металlostеклянном исполнениях. В большинстве случаев предпочтение отдают последним из-за технологичности их изготовления и низкой стоимости. Изоляторы таких вводов изготавливают из монолитного или порошкового стекла. Изоляторы из порошкового стекла значительно дешевле, имеют более высокую термостойкость и допускают большее различие в коэффициентах термического расширения стекла и металлического корпуса ввода по сравнению с изоляторами из монолитного стекла. Их широко применяют в отечественных и зарубежных вводах. Недостаток таких изоляторов — невысокая точность геометрических размеров (десятые доли миллиметра, против сотых долей — у изоляторов из монолитного стекла) и непрозрачность. Последнее обстоятельство лишает возможности оптического контроля внут-

$D$	$D_1$	$d$	$l$	$H$	$L$
5,1	3,42	1,00	1,8	2,3	8,5
1,95	1,70	0,45	2,0	1,0	6,0
2,75	2,70	1,00	4,0	1,4	16,0
5,60	4,00	0,95	8,0	7,0	17,35

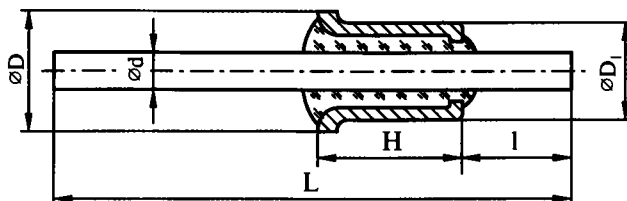


Рис. 12.1. Низкочастотные вводы ОАО Завод «Марс»

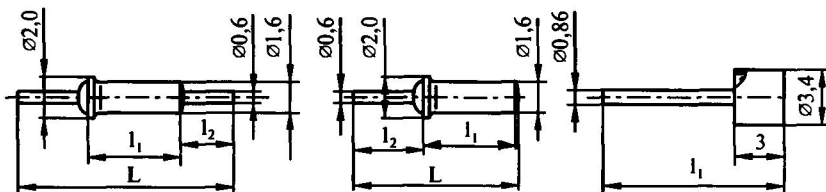


Рис. 12.3. НЧ-вводы (а) и изоляционные стойки (б, в) Размеры  $l$ ,  $l_1$  и  $L$  (см. табл. 12.1)

ренных дефектов и остаточных напряжений в стекле традиционными иммерсионно-оптическим и поляризационно-оптическим методами.

Низкочастотные вводы и изоляционные стойки выпускают те же предприятия, которые производят и металlostеклянные СВЧ-вводы. Серийное производство металlostеклянных вводов (изоляторов) (рис. 12.1) осуществляет ОАО «Завод «Марс», г. Торжок [86].

Корпус ввода изготовлен из стали, вывод — из сплава 29НК. В качестве изолятора используют порошковое стекло С52-1.

Изоляционные стойки являются конструктивным вариантом НЧ-вводов. В качестве таких стоек нередко используют отрезки полужесткого кабеля в металлической оболочке, в которых центральный проводник кабеля освобожден от фторопластовой изоляции. Однако они критичны к воздействию термоциклирования из-за специфических свойств фторопласта: низкой допустимой температуры нагрева, высокого коэффициента термического расширения, текучести и старения. Более надежны изоляционные стойки металlostеклянной конструкции.

Мелкосерийное производство НЧ-вводов и изоляционных стоек существует во ФГУП «НПП «Исток» [23]. Внешний вид вводов и стоек показан на рисунке 12.2, а их конструкции — на рисунке 12.3. Геометрические размеры и состав покрытия выпускаемых НЧ-вводов и изоляционных стоек приведены в таблице 12.1.



Рис. 12.2. Внешний вид низкочастотных вводов и изоляционных стоек

**Основные параметры вводов и изоляционных стоек**

Герметичность (скорость натекания), $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ .....	$1,3 \cdot 10^{-11}$
Сопротивление изоляции, МОм, более .....	1000
Допустимый ток, А (для НЧ-вводов) .....	3
Диапазон рабочих температур, °С .....	-60 +125
Масса, г .....	0,1

Требования к воздействию механических и климатических факторов – см. раздел 10.2.5.

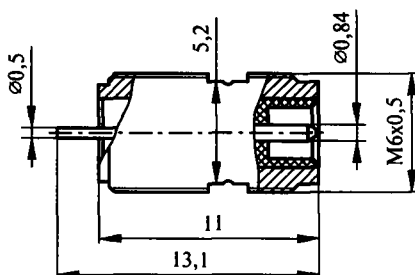


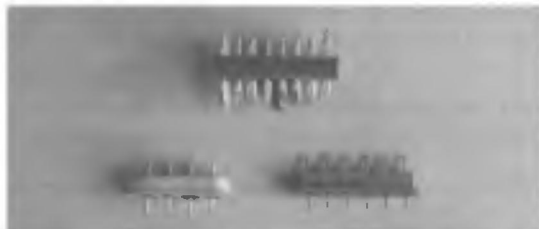
Рис. 12.4. Ввод КРПГ.433435 001

Кроме того, разработан ввод КРПГ.433435.001, предназначенный для соединения с радиочастотным кабелем при помощи кабельного соединителя СР-50-275ФВ (ВРО.364.015ТУ) (рис. 12.4). Ввод рассчитан на рабочий ток 3А. Он заменяет дорогостоящий металлокерамический ввод аналогичного назначения.

**Таблица 12.1. Геометрические размеры и состав покрытия НЧ-вводов и изоляционных стоек ФГУП «НПП «Исток»**

№	Обозначение	Геометрические размеры, мм			Состав покрытия металлических поверхностей
		$l_1$	$l_2$	$L$	
ВВОДЫ (ТСО.357.003 ТУ) – рис 12.3, а					
1	ТС3.575.337	2.35	2.6	7.5	Н3.О-Вн(99,7)6
2	ТС3.575.337-01	4.50	1.5	7.5	Н3.3л2
3	ТС3 575.337-02	4.50	2.0	10.5	Н3 О-Вн(99,7)6
4	ТС3.575.337-03	2.35	2.6	7.5	Н3.3л2
5	ТС3.575.337-04	4.50	1.5	7.5	Н3.О-Вн(99,7)6
6	ТС3.575.337-05	4.50	2.0	10.5	Н3.3л2
7	ТС3.575.337-06	4.50	5.0	14.5	Н3.О-Вн(99,7)6
8	ТС3.575.337-07	4.50	3.8	12.0	Н3.О-Вн(99,7)6
9	КРПГ433434.005	2.35	2.6	7.5	Н3.О-Вн(99,7)6
10	КРПГ433434.005-01	2.35	5.5	10.5	Н3.О-Вн(99,7)6
11	КРПГ433434.005-02	2.35	2.6	7.5	Н3.3л2
12	КРПГ433434.005-03	2.35	5.5	10.5	Н3.3л2
13	КРПГ.433435.001	рис. 12.4			
СТОЙКИ (ТСО.357.003ТУ) – рис. 12.3, б, в					
14	ТС4.886.004	2.35	2.6	5.2	Н3.О-Вн(99,7)6
15	КРПГ687213.001	2.35	1.5	4.2	Н3.О-Вн(99,7)6
16	КРПГ687213.001-01	2.35	2.6	5.2	Н3.О-Вн(99,7)6
17	КРПГ687213.001-02	2.35	1.5	4.2	Н3.3л2
18	КРПГ687213.001-03	2.35	2.6	5.2	Н3.3л2
19	ТС4.846.023	рис. 12.3, в			
					Н3.О-Вн(99,7)6

Наряду с одиночными вводами разработаны и выпускаются многовыводные металlostеклянные узлы с числом выводов от 2 до 76 (рис. 12.5).



**Рис. 12.5.** Многовыводные металlostеклянные узлы

Широкую номенклатуру многовыводных металlostеклянных корпусов выпускает ОАО «Завод «Марс» [86].

# МИНИАТЮРНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ

### 13.1. Электромагнитные помехи и методы их подавления

Борьба с электромагнитными помехами — одна из важнейших задач, требующих решения при создании РЭА СВЧ. Эта задача все более усложняется в связи с:

- возрастанием функциональных возможностей и сложности изделий,
- их миниатюризацией;
- увеличением плотности компоновки и усилением взаимного влияния компонентов;
- ростом рабочих частот;
- повышением надежности и долговечности и вследствие этого необходимостью герметизации изделий.

Решение проблемы ЭМС необходимо начинать еще на этапе проектирования РЭА. Если же она обнаруживается на стадии испытаний, производства или эксплуатации, ее решение, как правило, бывает дорогостоящим и часто неудовлетворительным из-за значительного уменьшения набора доступных средств борьбы с ЭМП и возрастания их стоимости [87].

Подробное рассмотрение ЭМП и их классификация даны в работах [3, 87–100]. Вследствие паразитной связи по электрическим цепям на выходе РЭА СВЧ возникают напряжения и токи, не соответствующие ее основному назначению. Например, паразитные наводки, проникающие с входа на выход малошумящего усилительного модуля, вызывают его самовозбуждение или изменение характеристик. Одна из главных причин паразитной связи — наличие общего сопротивления для всех каскадов усилителя, подключенных к источнику питания.

Из всех видов ЭМП наиболее опасны кондуктивные помехи, распространяющиеся в проводящей среде — цепях питания, управления, коммутации, а также в цепях полезных сигналов. Чаще всего 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, неэквипотенциальностью точек заземления отдельных элементов [91, 92].

Подавление помех достигается схмотехническими, конструкторскими и технологическими методами [3, 88, 89].

**Схмотехнические методы** заключаются в целенаправленном изменении структуры отдельных схем или введении в них дополнительных элементов для ослабления влияния ЭМП:

- использование элементной базы, особенно источников питания, с улучшенной помехоустойчивостью;
- применение помехоподавляющих фильтров в цепях питания;
- компенсация помех и т.д.

**К конструкторским методам** относятся:

- уменьшение числа конструкторско-технологических типов связи в одной цепи;
- ослабление паразитных связей путем разнесения источников и приемников помех;
- увеличение числа точек заземления и сечения проводников питания;
- уменьшение размеров контактных соединений, например, путем замены разъёмных на неразъёмные соединения;
- применение радиокомпонентов с улучшенными параметрами (соединителей, фильтров) и т.д.

**Технологические методы** включают в себя:

- повышение однородности линий одного технологического исполнения (печатных проводников, радиочастотных кабелей);
- уменьшение разброса параметров элементов схемы за счет их изготовления в едином технологическом цикле и др.

Из всех способов борьбы с ЭМП в цепях питания, управления и коммутации постоянного и переменного токов основным является фильтрация паразитных сигналов при помощи помехоподавляющих фильтров нижних частот (ФНЧ). Фильтры обеспечивают подавление межсистемных и внутрисистемных помех и «развязку» по СВЧ. Они защищают изделие микроэлектроники от внешних и внутренних помех, распространяющихся от источника питания и, наоборот, защищают сеть питания от помех, создаваемых изделием. Помехоподавляющий фильтр включают между источником и нагрузкой в каждый незаземленный провод в цепи питания по возможности ближе к источнику помех.

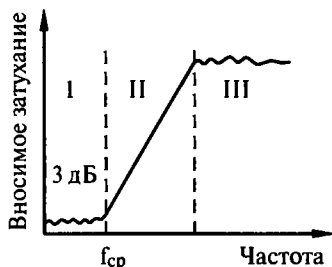
### 13.2. Принцип действия, основные параметры, электрические схемы, элементы конструкции фильтров нижних частот

Помехоподавляющий фильтр нижних частот представляет собой линейный четырехполюсник, состоящий из емкостей и индуктивностей и предназна-

ченный для частотной селекции сигналов. Фильтр выделяет из сложного электромагнитного колебания, подведенного к его входу, частотные составляющие в заданной полосе пропускания и подавляет составляющие в заданной полосе задержания (рис. 13.1) [87, 98–100].

Частота среза  $f_{\text{ср}}$  определяется величиной электрической емкости и практически не зависит от типа фильтра ( $C$ ,  $L$ - $C$ ,  $T$  или  $P$ ).

Общепризнано, что частота среза фильтров любых типов емкостью 100 пФ равна 100 МГц.



**Рис. 13.1.** Частотная зависимость вносимого затухания фильтра:  
I — полоса пропускания, II — полоса перехода, III — полоса задержания

Индуктивность также влияет на частоту среза фильтра. При заданной величине емкости чем больше индуктивность, тем меньше частота среза, особенно при малых величинах емкости (до 100 пФ). При больших значениях емкости влияние индуктивности на частоту среза незначительно.

Вносимое затухание определяют в 50-Омной измерительной схеме. При включении фильтра в электрическую схему, в которой сопротивления источника и нагрузки не равны 50 Ом, величина эффективного вносимого затухания фильтра отличается от измеренной [101]:

$$\alpha_{\text{эф}} (\text{дБ}) = 20 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{Z_{\text{н}} \cdot Z_{\text{н}}}{Z_{\text{н}} (Z_{\text{н}} + Z_{\text{н}})} \right], \quad (13.1)$$

где  $Z_{\text{и}}$  и  $Z_{\text{н}}$  — сопротивления соответственно источника и нагрузки, Ом;  $Z_{\text{п}}$  — сопротивление линии передачи, Ом, определяемое по графику (рис. 13.2) [101].

Например, если  $Z_{\text{и}} = 100$  Ом,  $Z_{\text{н}} = 50$  Ом, а величина вносимого затухания фильтра равна 50 дБ на частоте 100 МГц при измерении в 50-Омной схеме,  $Z_{\text{п}} = 0,08$  Ом (см. рис. 13.2) и

$$\alpha_{\text{эф}} (\text{дБ}) = 20 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{100 \cdot 50}{0,08 (100 + 50)} \right] = 52,44.$$



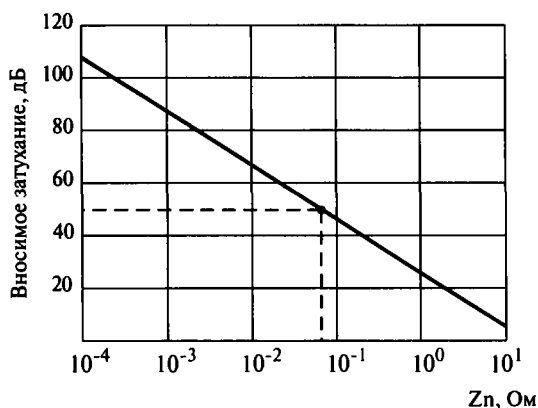


Рис. 13.2. График для определения сопротивления линии передачи

### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ФНЧ

Принцип действия ФНЧ основан на отражении и частичном поглощении ЭМП. Для эффективного отражения необходимо, чтобы емкостное сопротивление фильтра было минимальным, а значит, его электрическая емкость — максимально большой. В этом случае происходит шунтирование высокочастотных составляющих напряжения, подаваемого на вход фильтра. Поглощение ЭМП в фильтре происходит за счет магнитных потерь в индуктивности и диэлектрических потерь в емкости. Предпочтительнее фильтры, обеспечивающие подавление помех за счет их поглощения.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ФИЛЬТРОВ

Однозвенные помехоподавляющие фильтры нижних частот могут иметь различные принципиальные электрические схемы (рис. 13.3, а–д).

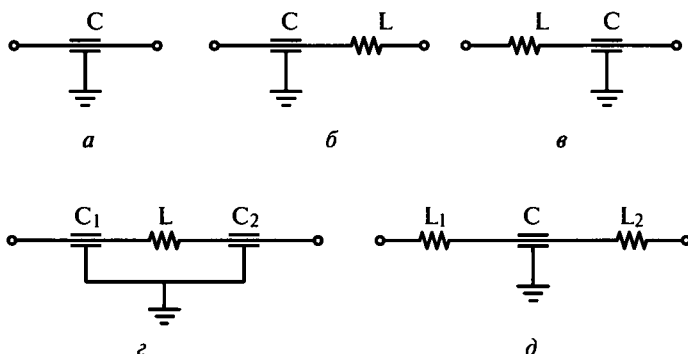


Рис. 13.3. Электрические схемы C-фильтра (а), L-C-фильтров (б, в), Pi-фильтра (г), T-фильтра (д)

**С-ФИЛЬТР** (рис. 13.3, а) представляет собой проходной конденсатор с тремя выводами. Подключенный между источником помехи и нагрузкой, емкостный фильтр осуществляет разделение постоянного тока или тока низкой частоты от тока высокой частоты. При большой величине емкости конденсатор шунтирует переменную составляющую тока, и она не попадает в нагрузку. Емкость фильтра для цепей питания должна быть тем большей величины, чем меньше сопротивление нагрузки:

$$\frac{1}{2\pi fC} < Z_n, \quad (13.2)$$

где  $f$  – частота,  $C$  – электрическая емкость,  $Z_n$  – сопротивление нагрузки.

При этом величину емкости следует выбирать для наименьшей рабочей частоты. Так, например, на частоте 1 ГГц при емкости 1500 пФ емкостное сопротивление фильтра мало (приблизительно 0,1 Ом) и происходит шунтирование высокочастотных составляющих напряжения, подаваемого на его вход.

Электрическую схему С-фильтра можно представить в виде последовательного соединения собственной емкости  $C$ , индуктивности выводов  $L$  и активного сопротивления  $r$  выводов, обкладок конденсатора и активных потерь в диэлектрике. Его полное сопротивление равно:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left( \frac{1}{2\pi fC} - 2\pi fL \right)^2}. \quad (13.3)$$

При этом фильтр имеет минимальное и чисто активное сопротивление на резонансной частоте:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (13.4)$$

На частотах ниже резонансной полное сопротивление фильтра носит емкостный, а на частотах выше резонансной – индуктивный характер.

**L-С-ФИЛЬТР** (рис. 13.3, б–в) состоит из одного индуктивного и одного емкостного элементов. Возможны два варианта их включения. При низком сопротивлении источника и высоком сопротивлении нагрузки применяют схему (рис. 13.3, б), в противоположном случае – схему на рисунке 13.3, в. Для правильного выбора должны быть известны величины этих сопротивлений во всем диапазоне рабочих частот. Если они неизвестны, правильнее выбирать схему на рисунке 13.3, в [91].

**Pi-ФИЛЬТР** (рис. 13.3, г) содержит два емкостных и один индуктивный элементы. Он предполагает низкие сопротивления источника и нагрузки. Наличие второго конденсатора значительно улучшает эффективность подавления помех. Pi-фильтры не рекомендуется использовать в цепях коммутации.

**Т-ФИЛЬТР** (рис. 13.3, д) состоит из двух индуктивных и одного емкостного элементов. Он предназначен для применения в цепях коммутации. Применение Т-фильтра предполагает высокие сопротивления входа и выхода.

Реальные частотные зависимости вносимого затухания  $S$  и  $Pi$ -фильтров с разной электрической емкостью представлены на рисунке 13.4 (данные фирмы Spectrum Control [101]).

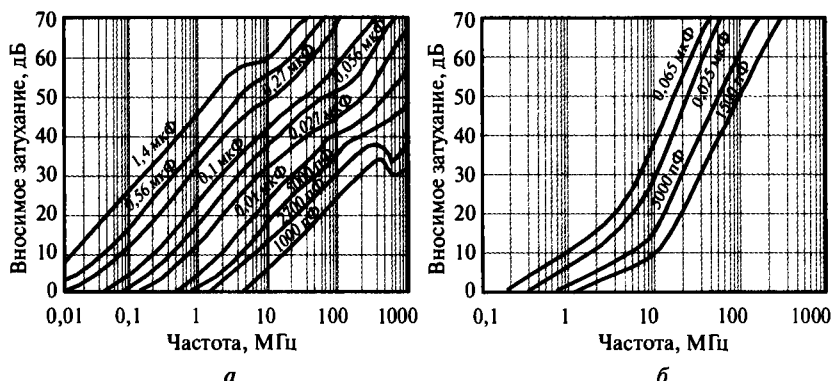


Рис. 13.4. Частотные зависимости вносимого затухания  $S$  (а) и  $Pi$ -фильтров (б) при разных величинах электрической емкости

Сравнение частотных зависимостей вносимого затухания фильтров, построенных на основе разных электрических схем (рис. 13.5) [101], показывает, что эффективность подавления ЭМП возрастает в последовательности  $S$ ,  $L-C$ ,  $T$ ,  $Pi$ -схемы.

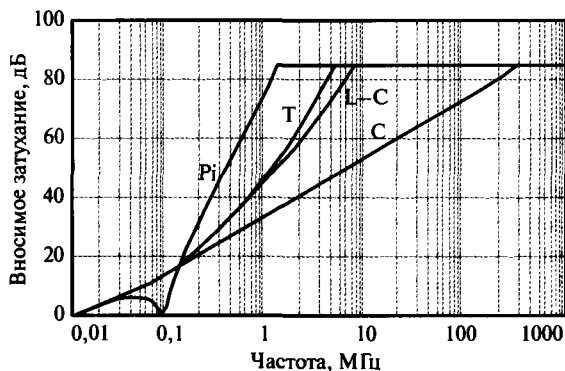


Рис. 13.5. Частотные зависимости вносимого затухания  $S$ ,  $L-C$ ,  $T$  и  $Pi$ -фильтров

К основным характеристикам фильтра относится величина его электрической емкости. Емкость определяет все основные параметры фильтра: частоту среза, резонансную частоту, ширину полосы перехода, уровень вно-

симого затухания в полосе задержания. Чем больше величина электрической емкости, тем меньше частота среза, резонансная частота, ширина полосы перехода и при этом выше уровень вносимого затухания.

Фильтр состоит из сопротивлений  $Z_L$ , включенного последовательно в один из проводов, и  $Z_C$ , включенного параллельно между проводом и корпусом фильтра («землей»). Величину последовательного сопротивления выбирают как можно большей, а параллельного – как можно малой ( $Z_C \ll Z_L$ ) [92]. При этом фильтр представляет собой делитель напряжения. Если подвести к нему напряжение помехи  $U_1$ , то ее напряжение на выходе уменьшится до величины  $U_2$ :

$$U_2 = U_1 \frac{Z_C}{Z_L + Z_C} \approx U_1 \frac{Z_C}{Z_L}. \quad (13.5)$$

Напряжение помехи уменьшится в  $n$  раз:

$$n = \frac{Z_L}{Z_C}. \quad (13.6)$$

Таким образом, зная величины емкости и индуктивности фильтра, можно приблизительно оценить величину его вносимого затухания. Например, если  $C = 1000$  пФ, а  $L = 0,1$  мкГн, напряжение помехи уменьшится в 100 раз, и величина вносимого затухания фильтра будет равна 20 дБ.

К фильтрам, применяемым в современных изделиях микроэлектроники СВЧ, предъявляют следующие основные требования [102]:

1. Миниатюрность.
2. Герметичность, определяемая скоростью натекания через фильтр,  $10^{-9} - 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ .
3. Высокий уровень вносимого затухания в диапазоне частот от частоты среза до 18 ГГц.
4. Отсутствие опасности повреждения фильтров при монтаже в изделие;
5. Допустимая температура кратковременного нагрева не ниже  $230^\circ\text{C}$  при пайке фильтров в корпуса изделий (без нарушения конструкции и ухудшения параметров фильтров).
6. Низкая стоимость.

## КОНСТРУКЦИЯ ФИЛЬТРОВ

Фильтры имеют коаксиальную конструкцию, основные элементы которой – проходной трубчатый или многослойный дисковый конденсатор и безвитковый дроссель в виде центрального токонесущего проводника, окруженного магнитопроводом (трубкой из термостабильного феррита). Отличительной особенностью такой конструкции является неизменный характер емкостного и индуктивного сопротивлений в широкой полосе частот. Использование конденсаторов проходного типа обусловлено их минимальной собственной

индуктивностью (на СВЧ индуктивное сопротивление конденсатора может даже превосходить его емкостное сопротивление [103]).

Корпусом фильтра нередко служит керамический конденсатор, наружную обкладку которого используют 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.

В качестве индуктивности в фильтрах применяют трубчатые ферритовые сердечники с внутренним центральным проводником. Основную долю (более 90%) в величину индуктивности вносит феррит. Казалось бы, величину индуктивности можно обеспечить в широких пределах, подобрав феррит с требуемой магнитной проницаемостью (начальная магнитная проницаемость  $\mu_n$  ферритов разных марок может быть от нескольких единиц до нескольких тысяч). Однако с ростом частоты начиная с критической частоты  $f_c$  (на которой тангенс угла магнитных потерь равен единице) магнитная проницаемость всех ферритов уменьшается. На частотах более 1 ГГц она близка к единице. К тому же для многих марок ферритов, имеющих низкую температуру Кюри —  $T_c$ , значительна зависимость магнитных свойств от температуры. В таблице 13.1 приведены некоторые свойства двух никель-цинковых ферритов: низкочастотного с высокой начальной магнитной проницаемостью феррита марки 1000 НН и высокочастотного феррита марки 50 ВН.

**Таблица 13.1.** Магнитные свойства ферритов 1000 НН и 50 ВН

Марка феррита	$\mu_n$	$\mu$ на частотах, МГц							$f_c$ , МГц	$T_c$ , °C
		0,1	5	10	100	400	600	1000		
1000 НН	1000	1000	600	300	-	-	-	~1	0,4	110
50 ВН	50	50	50	50	26	8	5	1,25	70	450

Для применения в фильтрах принято выбирать высокочастотные термостабильные никель-цинковые ферриты, обычно марки 50 ВН [104]. Хотя они имеют невысокую начальную магнитную проницаемость, но отличаются температурной стабильностью магнитных свойств, высокой критической частотой, временной стабильностью магнитной проницаемости при воздействии повышенных температур и длительном хранении при относительной влажности до 85% [105].

Емкость же фильтра можно изменять в широких пределах (от единиц пикофард до единиц микрофард), используя диэлектрики с диэлектрической проницаемостью до 20 000 и многослойные дисковые конденсаторы. При этом с ростом частоты диэлектрическая проницаемость уменьшается не столь значительно, как магнитная проницаемость.

Герметизацию фильтров осуществляют одним из двух способов: заливкой обоих торцов корпуса фильтра термостойким компаундом, иногда с пос-

ледующим покрытием компаунда изоляционным лаком, или при помощи металлостеклянного (реже металлокерамического) спая. В первом случае герметичность фильтра, характеризующаяся скоростью натекания по спаям и материалам фильтра, не регламентируется. Во втором случае обеспечивается его вакуумная плотность: скорость натекания менее  $1,3 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Па/с при проверке на гелиевом течеискателе. В современной герметизированной РЭА СВЧ стремятся применять только герметичные фильтры.

При выборе фильтра наряду с параметрами подавления помех необходимо учитывать его номинальные рабочие напряжения и ток, сопротивление изоляции (определяющее токи утечки), а также условия эксплуатации. Кроме того, необходимо знать конструктивные особенности фильтра, его габаритные и установочные размеры, вид покрытия металлических поверхностей, способ установки фильтра и допустимую температуру нагрева при его монтаже в изделие.

### 13.3. Помехоподавляющие фильтры зарубежных фирм

Зарубежные фирмы Spectrum Control Inc, Maxwell (Sierra Capacitor/Filter division), Erie, AMP (США), Tusonix Inc., Eurofarad (Франция), Oxley Developments Co. Ltd. (Великобритания), MuRata MFG Co. Ltd. (Япония) и др. разработали и выпускают несколько сотен типоразмеров проходных помехоподавляющих фильтров с С, L-С или Pi-электрическими схемами. По конструктивному исполнению эти фильтры можно отнести к одному из четырех типовых вариантов:

1. Миниатюрные, герметизированные металлостеклянным спаем, безрезьбовые, впаиваемые в корпуса устройств (Miniature Solder – in Filters, Solder – in Styles, Solder Mount).
2. Герметизированные компаундом, безрезьбовые, впаиваемые в корпуса устройств (Solder – in Filters, Solder – in Pi-Circuit, Solder Mount Pi-Filter, Eyelet Style).
3. Герметизированные компаундом, резьбовые (Resin Sealed Bolt-in Filters, Bolt Style Epoxy Seals).
4. Герметизированные металлостеклянным спаем, резьбовые (Bolt Style Hermetic Filters).

#### МИНИАТЮРНЫЕ БЕЗРЕЗЬБОВЫЕ, ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫМ СПАЕМ И КОМПАУНДОМ ФИЛЬТРЫ

Конструкция фильтров показана на рисунке 13.6, а их основные параметры приведены в таблице 13.2, раздел 1.

Подавляющее большинство этих фильтров представляют собой С-фильтры (проходные конденсаторы). Фирмы Maxwell и Eurofarad выпускают так-

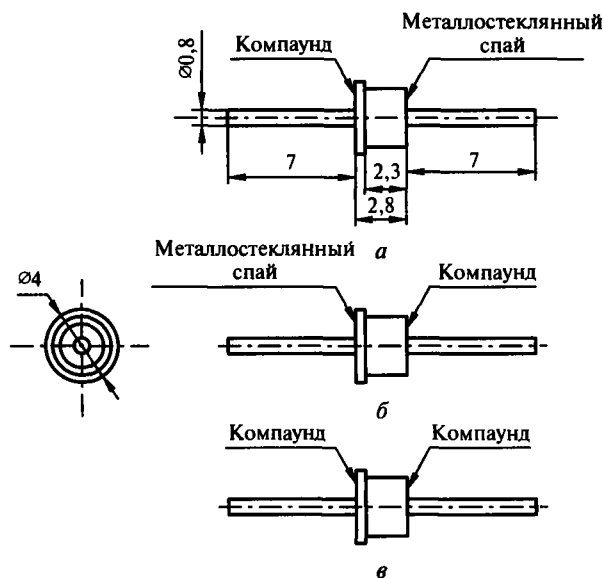


Рис. 13.6. Миниатюрные, герметизированные металлостеклянным спаем и компаундом безрезьбовые С и L-С-фильтры

же L-С-фильтры этого исполнения. Металлостеклянный спай располагают на одном из концов фильтра. Противоположный конец обычно герметизируют эпоксидным компаундом. Фильтры, герметизированные металлостеклянным спаем, имеют повышенную надежность и выдерживают кратковременный нагрев до температуры 300°C при пайке в корпуса устройств.

Таблица 13.2. Миниатюрные безрезьбовые, впаиваемые в корпуса устройств, фильтры зарубежных фирм

Фирма	Электрическая схема	Серия или номер фильтра	Число типоразмеров	Электрическая емкость, пФ	Источник
I. Фильтры, герметизированные металлостеклянным спаем и компаундом					
Spectrum Control	C	SCI-9900	9	5–30000	[101]
Maxwell	C	1210	8	10–15000	[106]
		1610	6	1000–50000	
	L-C	1230	8	10–15000	
		1630	6	4000–50000	
Tusonix	C	4300	58	5–50000	[107]
Eurofarad	C	FC-030	16	100–33000	[110]
MuRata	C	MJ9900	2	100, 1200	[108, 109]
		DFS-306-801	3	2, 100, 12000	

Таблица 13.2. Окончание

Фирма	Элект- рическая схема	Серия или номер филь- тра	Число ти- поразмеров	Электричес- кая емкость, пФ	Источник
II Фильтры, герметизированные компаундом					
Spectrum Control	C	54-786-003 54-785-002	1 1	300000 50000	[101]
	Pi	51-703 51-707-002 51-750	2 1 2	1500, 5500 1750 12000, 22000	
Tusonix	C	4302	13	5—50000	[107]
	Pi	4151	18	1500—60000	
MuRata	Pi	MJ 1200	3	1500, 12000	[108,109]
		NFH 404	1	1500	
		NFS 305	2	—	
AMP	C	CA	1	4000—10000	[112,113]
		CC	1	1300—2500	
		CD	1	600—1000	
		CE	1	400—600	
		CF	1	240—360	
	L-C	DA-M	2	4000—8000	
		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	[114]
Eurofarad	L-C	FL - 030	22	100—33000	[110]

В таблице 13.2 приведены серии фильтров, представляющих наибольший интерес для РЭА СВЧ. Номера конкретных фильтров в каждой серии указаны в каталогах фирм, а также в работе [111]. Представлены только фильтры с наименьшими габаритными размерами. Общее количество типоразмеров фильтров в несколько раз больше.

#### Параметры фильтров

Электрическая емкость, пФ ..... 5—50000

Разброс емкости, % ..... 0,2 при емкости от 5 до 100 пФ и  
3 при емкости, большей 100 пФ

Отклонение емкости в зависимости

от температуры и напряжения, % ..... +15 ...- 40

Номинальное напряжение, В ..... 50, 100 и 200 по постоянному току или  
115 по переменному току с частотой 400 Гц  
(чем больше электрическая емкость,  
тем ниже напряжение)

Номинальный ток, А ..... 5, 10 и 15



Сопротивление изоляции, ГОм .....	1
Диапазон рабочих температур, °С .....	-55...+150
Герметичность (скорость натекания), м <sup>3</sup> /Па/с .....	менее 10 <sup>-9</sup>

Частотная зависимость вносимого затухания фильтров показана на рисунке 13.4. На частотах выше 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 [106], величины вносимого затухания С и L-С-фильтров с одинаковой электрической емкостью одинаковы во всем диапазоне частот, что, однако, противоречит данным других фирм.

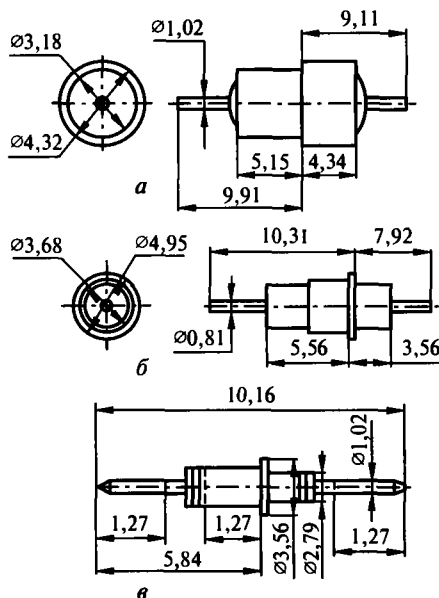


Рис. 13.7. Безрезьбовые герметизированные компаундом фильтры. С-фильтры фирм Spectrum Control и Tusonix (а), Pi-фильтры фирм Spectrum Control и Tusonix (б), L-С- фильтры фирмы AMP (в)

### ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ КОМПАУНДОМ БЕЗРЕЗЬБОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

Конструкции фильтров показаны на рисунке 13.7, а их основные параметры приведены в таблице 13.2 раздел II.

#### Параметры фильтров

Электрическая емкость, пФ .....	от 5 до 300000
Разброс емкости, % .....	3

Отклонение емкости в зависимости от температуры и напряжения, % .....	+15...-40
Номинальный ток, А .....	5, 10 и 15
Номинальное напряжение, В .....	50, 100, 200 и 350
Сопротивление изоляции, ГОм .....	0,1
Величина вносимого затухания .....	см. рис.13.4
Герметичность .....	не регламентируется
Диапазон рабочих температур, °С .....	-55°С...+125

### ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ КОМПАУНДОМ РЕЗЬБОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

Эти фильтры имеют широкое применение в РЭА СВЧ. Миниатюрные фильтры выпускают с дюймовой резьбой типов 4-40 UNC-2A, 6-32 UNC-2A, 6-40 UNF-2A или 8-32 UNC-2A, приблизительно эквивалентной метрической резьбе соответственно М3х0,5, М3,5х0,6 и М4х0,7. Фирмы Eurofarad, MuRata, а также Tusonix, выпускают фильтры не только с дюймовой, но и с метрической резьбой. Конструкция миниатюрных резьбовых фильтров, герметизированных компаундом, показана на рисунке 13,8 [101]. В таблице 13.3 приведены основные параметры этих фильтров.

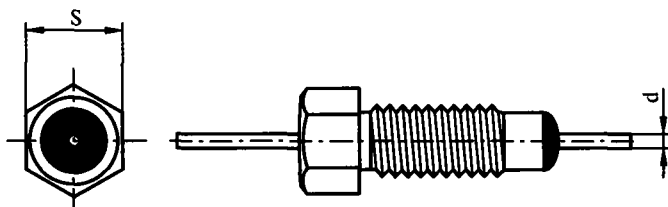


Рис. 13.8. Миниатюрные резьбовые фильтры, герметизированные компаундом:  
 $S = 3,18; 3,96$  и  $4,75$ ,  $d = 0,51; 0,76$  и  $1,02$  мм. Тип резьбы – см табл. 13.3

Таблица 13.3. Герметизированные компаундом резьбовые фильтры

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	[101]
		L-C	SCI-3122	3	10000	
			SCI-3112	6	27000, 50000	
			SCI-3102	3	75000	
	6-32 UNC-2A	Pi	51-729	3	1500, 5500, 7000	
		C	54-779	6	10–100000	
		L-C	51-726	1	22000	
		Pi	51-726	3	1500, 5500, 9000	
	8-32 UNC-2A	L-C	51-712	2	22000, 31000	
		Pi	51-712	7	2000–30000	

Фирма	Тип резьбы	Элек-три-ческая схема	Серия или номер фильтра	Число типо-разме-ров	Электрическая емкость, пФ	Источ-ник
Maxwell	4-40 UNC-2A	C	5010	4	1000—27000	[106]
		L- C	5030	3	10000—46000	
Tusonix	4-40 UNC-2A	C	4400	48	25—50000	[107]
		L-C	4400-050	9	100—50000	
		Pi	4261	2	2000, 5000	
	6-32 UNC-2A	C	4402	6	5—100000	
		L- C	4402-060	2	4700, 27000	
		Pi	4260	3	2000, 5500, 7500	
	8-32 UNC-2A	C	2425	4	100—10000	
			4404	3	22000—100000	
		L- C	4404-050	1	22000	
			4205	3	65, 1500	
			4201	10	1000, 5500	
			4251	4	3000—30000	
MuRata	M 3 x 0,5	C	DFT301	3	1000, 4700, 10000	[108,109]
	M 3,5 x 0,6		DFT304	1	3300	
	M 3,5 x 0,35		DF553	1	1000	
	M 4 x 0,7	Pi	NFT403	1	-	
	M 5x0,8		NFT501	3	-	
	8-32 UNC-2A		MJ1283	1	12000	
AMP	8-32 UNC-2A	L- C	DA- M	1	4000—8000	[112,113]
			DB- M	1	3000—5000	
			DC- M	1	1500—3000	
			DF- M	1	160—250	
			DG- M	1	80—125	
Simens Matsushita	M 6 x 0,5	Pi	B85313-A-B7	1	1600	[114]
Oxley	6-32 UNC-2A	C	DLT4/C	6	330—22000	[115]
		L- C	DLT4/L	6	330—22000	
	8-32 UNC-2A	Pi	-	2	1500, 4000	
Eurofarad	4 - 40UNC-2A 6 - 32UNC-2A 8 - 32UNC-2A M 3 x 0,5 M 4 x 0,7	C	FC - 030 FC - 035 FC - 040	16	100—33000	[110]
	8-32 UNC-2A M 4 x 0,7	L- C	FL - 040	10		
	M 3 x 0,5 6 - 40UNF-2A 8-32 UNC-2A	Pi	FP - 035 FP - 040	34	100—33000	

**Параметры фильтроа**

Электрическая емкость, пФ .....	25–100000,
Пределы изменения емкости, % .....	0–100
Номинальное напряжение, В .....	50; 70; 100; 200 и 300
Номинальный ток, А .....	3; 5; 7; 10
Сопротивление изоляции, ГОм .....	0,1
Величина вносимого затухания .....	см. рис.13.4
Герметичность .....	не регламентируется
Диапазон рабочих температур, °С .....	-55...+125

**ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫМ  
СПАЕМ РЕЗЬБОВЫЕ ФИЛЬТРЫ**

Эти фильтры, как правило, достаточно велики по своим размерам и массе, имеют большую электрическую емкость (от десятых долей до нескольких микрофарад) и предназначены для фильтрации ЭМП с частотами более 10 кГц [101]. Миниатюрные герметичные С и L-С-фильтры с резьбой 4-40 UNC-2А выпускают фирмы Maxwell и Eurofarad. Maxwell предлагает С-фильтры (серия 5020, 8 типоразмеров) и L-С-фильтры (серия 5040, 8 типоразмеров). Eurofarad выпускает аналогичные фильтры FP-035 и FP-040 с резьбой 8-32 UNC-2А. Конструктивно эти фильтры мало отличаются от аналогичных фильтров, герметизированных компаундом. В фильтрах с большой электрической емкостью использованы многослойные дисковые конденсаторы.

**Параметры фильтров**

Электрическая емкость, пФ .....	1000–50000
Номинальное напряжение, В .....	50–200
Номинальный ток, А .....	3
Сопротивление изоляции, МОм, более .....	1000
Величина вносимого затухания, см. ....	рис 13.4
Диапазон рабочих температур, °С .....	-55 ... + 125.

**13.4. Отечественные фильтры**

Ведущими российскими предприятиями по разработке и серийному выпуску проходных керамических конденсаторов и фильтров для подавления помех в диапазоне частот от 10 кГц до 10 ГГц являются ОАО НИИ «Гириконд» и ОАО «Кулон», г. Санкт-Петербург [104, 116].

**КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ**

Керамические проходные конденсаторы выпускаются в двух конструктивных исполнениях: с резьбовыми втулками (КТП, КО, КДО) и с безрезьбовыми втулками для крепления пайкой в устройства (К10П-4, К10-51) [104, 116]. Конденсаторы имеют следующие параметры:

### Параметры конденсаторов

Электрическая емкость, пФ .....	3,3–15 000
Температурный коэффициент емкости, $1/^{\circ}\text{C}$ .....	$-1500 \cdot 10^{-6} \dots +100 \cdot 10^{-6}$
Номинальное напряжение, В .....	350–800
Номинальный ток, А .....	10 и 15
Сопротивление изоляции, МОм .....	не менее 10 000 (4000 для К10-51)
Величина вносимого затухания .....	не регламентируется
Герметичность .....	не регламентируется
Рабочий диапазон температур, $^{\circ}\text{C}$ .....	$-60 \dots +125$
Срок сохраняемости, лет .....	12
Срок паяемости выводов без дополнительного облуживания, месяцев .....	12
Минимальная наработка, часов .....	15 000
Масса, г ..	от 1,5 (КО-1, КДО-1) до 6 (КТП-3)

Конструкция и параметры конкретных типов конденсаторов (их более 50) приведены в работах [104, 111, 116]. Кроме того, разработаны и выпускаются дисковые многослойные конденсаторы типа К10-54 с повышенной емкостью. Они состоят из чередующихся тонких слоев диэлектрика и серебряно-палладиевых электродов [104].

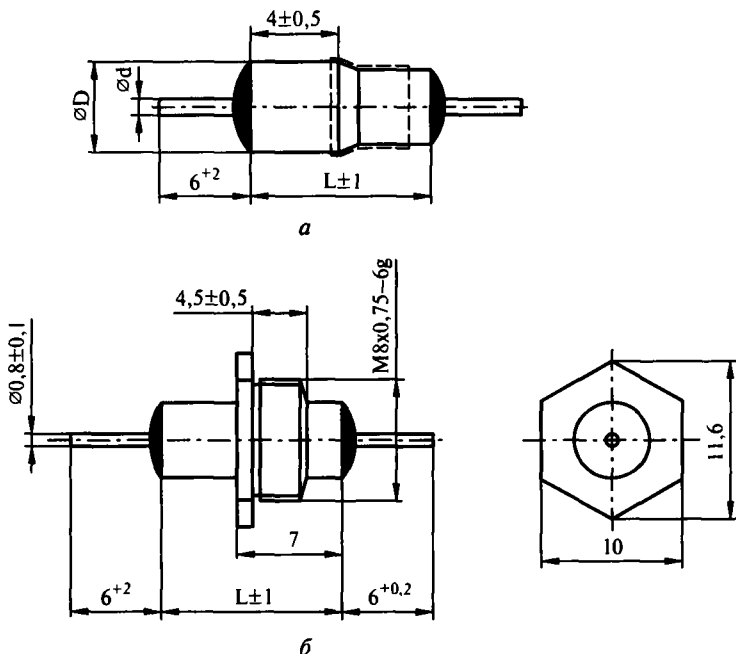


Рис. 13.9. Фильтры Б7-2, Б23А (а), Б14, Б23 (б)  
Размеры  $l$  и  $D$  — см. табл. 13.4

**Параметры конденсаторов К10-54**

Электрическая емкость, мкФ .....	0,00015–6,8
Допустимое относительное изменение емкости в диапазоне температур .....	-60...+125°C, % $\pm 10$ – $\pm 90$
Номинальное напряжение, В .....	50–250

Конденсаторы К10-54 емкостью 0,047–6,8 мкФ применяют в конструкции фильтра Б23Б.

**КЕРАМИЧЕСКИЕ ПРОХОДНЫЕ ФИЛЬТРЫ**

Проходные Pi-фильтры типов Б7-2 [117], Б14, Б23, Б23А, Б23Б [118] и Б24 [119] предназначены для подавления помех в диапазоне частот 0,007–10 ГГц. Фильтр Б23Б имеет слишком большие габаритные размеры и массу и в дальнейшем не рассматривается.

Фильтры содержат два трубчатых конденсатора, емкость каждого из которых равна половине номинальной емкости. Индуктивный элемент представляет собой центральный проводник с надетой на него феррито-

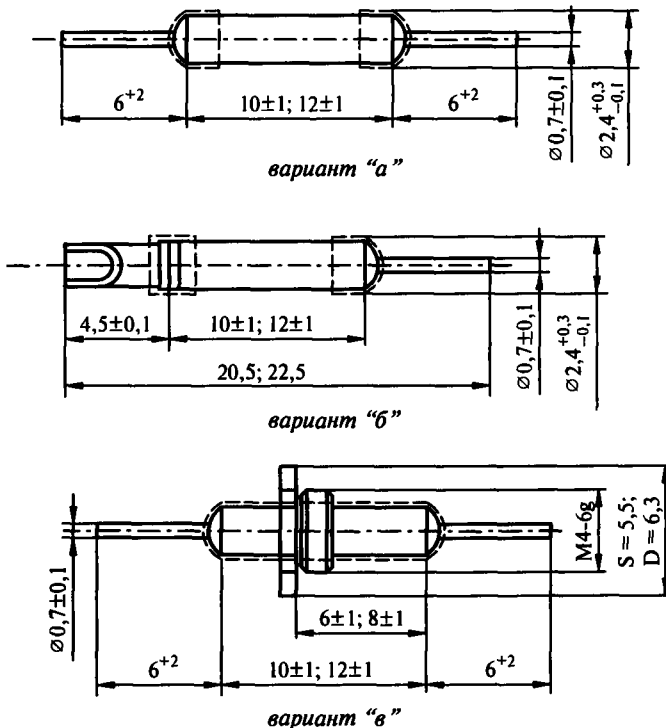


Рис. 13.10. Фильтры Б-24

вой трубкой. Индуктивность фильтров разных типов — 0,03–1,8 мкГн [104]. Конструкции фильтров показаны на рисунке 13.9 и 13.10.

**Таблица 13.4. Геометрические размеры, масса и электрические параметры фильтров**

Тип фильтра	Номинальная емкость, пФ	Геометрические размеры, мм		Масса, г	Рабочий диапазон частот, ГГц	Минимальное вносимое затухание, дБ, на частотах, ГГц							
		L	D			0,1	1,0	1,5	4,0	6,0	10		
		рис.13.9											
Б7-2	4700	12	6	4,0	0,1–1,5	35	35	35	-	-	-		
Б14	2200, 3300, 4400	12	-	4,0	0,1–1,5	40	40	40	-	-	-		
Б23	2200,3300	12	-	6,0	0,1–6,0	45	45	45	40	40	-		
	4700,6800	25	-	2.0									
Б23А	1000	10	5	2.0	0,1–10,0	45	45	45	45	40	40		
	1500	12	-	2,5									
Б24	43–91	рис.13.10		-	0,007-10	≤35	35–65	-	-				
	91–240												
	240–560												
	560–910												
	910–1600					40–65	60–65						
	1600–3000												
	3000–5100												
	5100–10000											65–70	60–65

Фильтры герметизированы специальным органическим компаундом. Фильтры Б14, Б23 и Б24 (вариант «в») предназначены для резьбового паяного соединения, фильтры остальных типов — для безрезьбового паяного соединения с корпусами устройств.

#### Основные параметры фильтров

Изменение электрической емкости, %	..... менее 30, +80...-20 (фильтры Б24 емкостью более 3000 пФ)
Номинальное напряжение, В	..... 250 (Б7-2, Б23), 300 (Б23), 500 (Б14), 100 и 250 (Б24)
Номинальный ток, А	..... 5 (Б7-2, Б14, Б23) 10 (Б23а емкостью 1000 пФ) 15 (Б23а емкостью 1500 пФ) 1 (Б24 емкостью менее 910 пФ), 5 и 10 (Б24 емкостью более 910 пФ)
Сопротивление изоляции, МОм	..... более 30 10000 (Б24 емкостью менее 910 пФ), 40000 (Б24 емкостью более 910 пФ)
Герметичность	..... не регламентируется,
Срок сохраняемости, лет	..... 20 (12 для Б7-2)

Минимальная наработка, час ..... 10000–15000  
 Рабочий диапазон температур, °С ..... -60...+125 (-60...+85°С  
 для фильтров с емкостью  
 более 1000 пФ)

По комплексу параметров лучшими являются фильтры Б24 [104, 119].  
 Фильтры (за исключением Б24), разработанные предприятиями г. С.-Петербурга, имеют большие габаритные размеры и массу, низкую допустимую температуру нагрева при пайке в корпуса устройств и недостаточную герметичность.

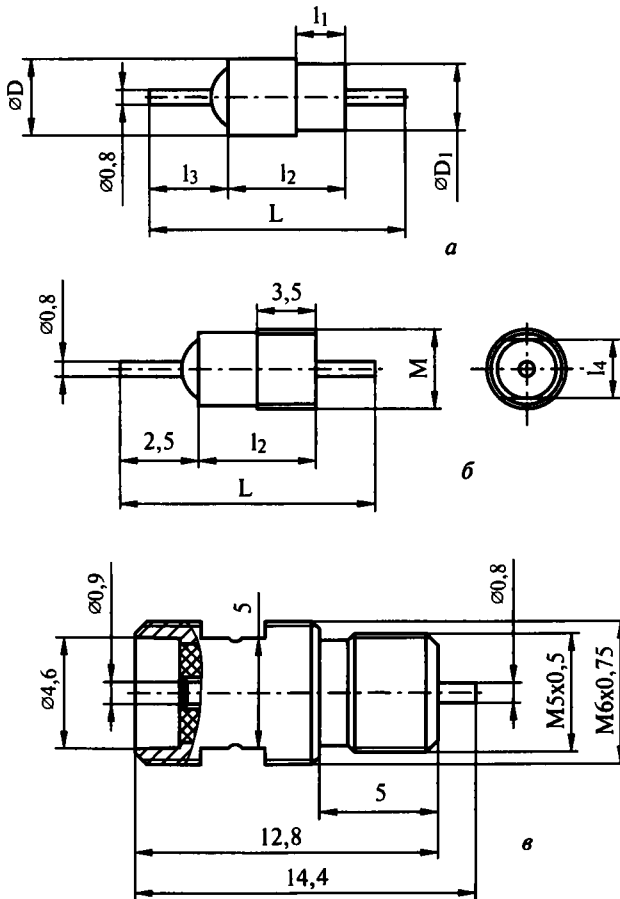
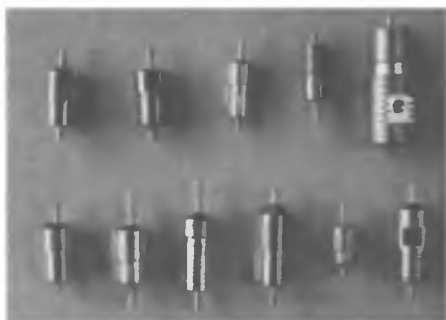


Рис. 13.11. Безрезьбовые (а), резьбовые (б) и кабельный (в) фильтры  
 ФГУП «НПП «Исток». Размеры  $l_1$ – $l_4$ ,  $D$ ,  $D_1$ ,  $M$  приведены в табл. 13.5





**Рис. 13.12. Внешний вид фильтров ФГУП «НПП «Исток»**

Работы по созданию более совершенных фильтров проводились несколькими предприятиями нашей страны [111].

**ФИЛЬТРЫ ФГУП «НПП «ИСТОК»**

Во ФГУП «НПП «Исток» разработана серия миниатюрных герметичных L-C-фильтров для подавления ЭМП в цепях питания и управления РЭА СВЧ [26, 102, 111, 120]. Конструкция фильтров показана на рисунке 13.11, а их внешний вид – на рисунке 13.12.

Разработаны миниатюрные безрезьбовые (8 типоразмеров), резьбовые (3 типоразмера) и кабельный (для подвода питающего напряжения при помощи радиочастотного кабеля) фильтры. Все фильтры герметизированы металlostеклянным спаем, обеспечивающим их вакуумную плотность. Отличительной особенностью фильтров является отсутствие в их конструкции органических материалов, что позволяет повысить радиационную стойкость и допустимую температуру кратковременного нагрева до 340°C.

**Таблица 13.5. Геометрические размеры фильтров**

[illegible]

Основные параметры фильтров приведены в таблице 13.6.

**Таблица 13.6. Основные параметры фильтров ФГУП «НПП «Исток»**

№ п/п	Обозначение	Технические условия	Емкость, пФ, не менее	Величина вносимого затухания, дБ, на частотах, ГГц				
				0,01	0,1	1,0	10	18
1 2 3	ТС2.263 017 ТС2.263.017-01 ТС2.263.017-02	ТСО 226 004ТУ	5000	20	35	55	60	60
4 5 6	КРПГ433553 001 КРПГ433553 001-01 КРПГ433553 001-02	ТСО.028 052ТУ	3000	15	30	50	60	60
7 8	КРПГ433553.002 КРПГ433553.002-01		2500	13	25	45	50	55
9	КРПГ433553.002-02		1500	10	20	40	50	50
10	КРПГ433553 003	КРПГ.433553 003ТУ	3000	15	30	50	60	60
11	КРПГ433553.005	КРПГ.433553.005ТУ	100	-	<3	20	30	35
12	КРПГ433553.005-01		50	-	-	20	25	30

#### Технические характеристики

Герметичность (скорость натекания), м<sup>3</sup>·Па/с..... 1,3·10<sup>-11</sup>  
 Сопротивление изоляции, МОм, не менее .....5000  
 Допустимая температура кратковременного нагрева, °С ..... 340  
 Номинальное напряжение, В ..... 150  
 Номинальный ток, А ..... 5  
 Диапазон рабочих температур, °С .....-60...+125  
 Покрытие металлических поверхностей..... НЗ.Пд-Н(80)6 или (Н-Б)6  
 Масса, г, не более ..... 0,5 (фильтры № 1- 9, 11-12),  
 1,4 (фильтр № 10)

Разработанные фильтры обеспечивают эффективное подавление ЭМП в цепях питания, а также «развязку по СВЧ» в радиоэлектронной аппаратуре и по комплексу параметров соответствуют зарубежным аналогам.

# МИНИАТЮРНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ

### 14.1. Назначение и основные требования к фильтрам для цепей управления

Для управления параметрами устройств микроэлектроники СВЧ применяют наносекундные видеоимпульсы напряжения или тока с амплитудой  $A$ , длительностью  $t_0$  и периодом следования  $T$ . Необходимо, чтобы устройство ввода импульсов существенно не искажало эти параметры. В противном случае возрастает время выхода на рабочий режим и ухудшаются параметры устройства. Ситуация осложняется тем, что современные микроэлектронные устройства СВЧ должны иметь герметизированное исполнение. Поэтому устройство ввода импульсов также должно быть герметичным. Для этой цели используют металlostеклянные вводы. Так как их электрическая емкость мала (единицы пикофард), они пропускают импульсы, не искажая их. Но вводы не обеспечивают помехозащищенности устройства, так как через них просачивается электромагнитная энергия. Поэтому для ввода импульсных сигналов применяют герметичные фильтры нижних частот.

К таким фильтрам предъявляют следующие требования [102]:

1. Способность пропускать импульсы без существенного искажения их формы и ослабления.
2. Герметичность, определяемая скоростью натекания гелия через фильтр, на уровне  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с.
3. Миниатюрность (диаметр корпуса фильтра не более 6 мм).
4. Вносимое затухание более 15–20 дБ в полосе частот задержания фильтра.
5. Возможность монтажа и пайки при температуре не ниже 230°C в корпус устройства без нарушения конструкции и ухудшения параметров фильтра.

### 14.2. Влияние фильтра на параметры импульса

Фильтр нижних частот представляет собой четырехполюсник с реактивными элементами. В таких электрических цепях имеют место переходные процессы при прохождении импульсов. Ток в индуктивности не может изменяться

скачком, поэтому в момент падения импульса индуктивность подобна разрыву цепи в месте ее включения. По мере нарастания тока ее действие все больше соответствует короткому замыканию. На емкости же не может измениться скачком напряжение. Поэтому в первый момент она оказывает действие, подобное короткому замыканию между точками ее включения. По мере того как емкость заряжается, ток через нее уменьшается. При полной зарядке емкость аналогична разрыву.

Совместное действие этих процессов вызывает искажение формы импульса: появление времени фронта  $t_\phi$  и спада  $t_{\text{сп}}$  и изменение амплитуды  $\Delta A$  (рис. 14.1). Время фронта и время спада принято отсчитывать по уровню амплитуды 0,9A и 0,1A.

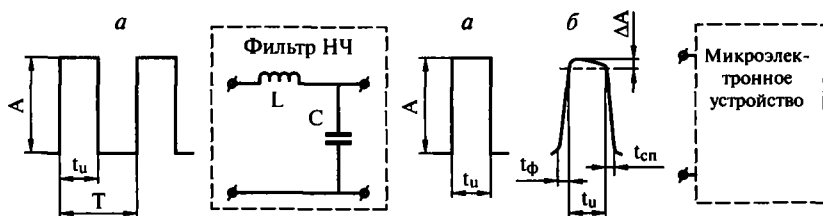


Рис. 14.1. Неискаженные (а) и искаженные (б) импульсы, поступающие в микроэлектронное устройство с выхода фильтра

На рисунке 14.1 в качестве примера показаны входные прямоугольные импульсы. Получить идеальные прямоугольные импульсы технически сложно. Реальные импульсы имеют форму, близкую к трапецеидальной. При конструировании фильтра необходимо выбрать его индуктивность и особенно емкость такими, чтобы искажение формы импульса было минимальным. Для этого нестационарные явления, вызванные в электрической цепи фильтра воздействием данного импульса, должны полностью заканчиваться к началу следующего импульса. В общем виде это требование к фильтру можно сформулировать следующим образом: постоянная времени электрической цепи фильтра должна быть велика по сравнению с периодом следования импульсов. На практике это означает, что емкость и индуктивность фильтра должны быть минимальными.

Фильтр с большей емкостью в цепи импульсных сигналов вызывает изменение формы, частотные и фазовые искажения входных импульсов. На низких частотах происходит скос «крыши» импульса, на высоких — возрастание длительностей его фронта и спада вследствие переходных процессов в фильтре [102]. Искажения формы импульсов можно избежать, если обеспечить равенство волновых сопротивлений фильтра и линии с нагрузкой, однако на практике это условие нереализуемо.

### 14.3. Спектральный состав импульса. Условие прохождения импульса без искажений

Периодическую последовательность импульсов можно представить гармоническим рядом Фурье. Например, для прямоугольных импульсов длительностью  $t_u$  и периодом следования  $T$ , где  $0 < t_u < T$ , этот ряд выглядит следующим образом:

$$f(\omega t) = A \left( \frac{t_u}{T} + 2\pi \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k \frac{t_u}{T}}{k} \pi \cos k \omega t \right), \quad (14.1)$$

где  $\omega$  — угловая частота.

Этот ряд состоит из постоянной составляющей и из бесконечного числа гармонических составляющих с определенными частотами, амплитудами и начальными фазами (спектр сигнала). Так как гармонические составляющие отличаются в целое число раз от частоты первой гармоники, то спектральные линии отстоят друг от друга на интервал частот  $\Delta f$ , равный частоте первой гармоники. Таким образом, дискретные спектры сигналов состоят из составляющих с кратными частотами ( $f, 2f, 3f, \dots kf$ ) [121, 122].

Чтобы полностью сохранить форму импульса фильтр должен пропустить сумму всех составляющих спектра. На практике, однако, в этом нет необходимости, так как амплитуды гармоник уменьшаются с увеличением их номера. Степень допустимого искажения формы импульса определяет минимальное число гармоник, пропускаемых фильтром. Практически для неискаженной передачи можно ограничиться передачей активной ширины спектра импульса. Верхний предел частоты для прямоугольного импульса равен:

$$\frac{1}{2\pi f C} < Z_u \quad [122, 123], \quad (14.2)$$

где  $t_u$  — длительность импульса, с.

Для импульса с  $t_u = 20$  нс  $f_{\text{верхн}} = 100\text{--}150$  МГц.

Для трапецеидальных импульсов со временем фронта  $t_\phi$  верхняя частота равна:

$$f_{\text{верхн}} (\text{МГц}) \approx \frac{0,35 - 1,0}{t_\phi} \quad [123]. \quad (14.3)$$

Чем короче импульс, который надо передать без существенных искажений, тем более широкая полоса пропускания должна быть обеспечена фильтром. Полоса пропускания фильтра нижних частот должна быть больше

спектра передаваемого сигнала. Полосой пропускания ФНЧ является область частот, меньших частоты среза фильтра  $f_{\text{ср}}$ . Для  $L$ - $C$ -фильтра:

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (14.4)$$

где  $L$  и  $C$  — соответственно его индуктивность и емкость.

Таким образом, для передачи импульсов без искажения должно выполняться условие:

$$f_{\text{ср}} > f_{\text{верхн}} \text{ или}$$

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} > \frac{2-3}{t_u} \quad \text{— для прямоугольного импульса,} \quad (14.5)$$

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} > \frac{0,35-1}{t_\phi} \quad \text{— для трапецеидального импульса.} \quad (14.6)$$

На практике частоту среза фильтра определяют путем измерения частотной зависимости его вносимого затухания. На рисунке 14.2 приведена зависимость частоты среза от электрической емкости, построенная по усредненным данным зарубежных фирм — производителей фильтров [102].

Частота среза определяется величиной электрической емкости и практически не зависит от типа фильтра ( $C$ ,  $L$ - $C$ ,  $T$  или  $Pi$ ).

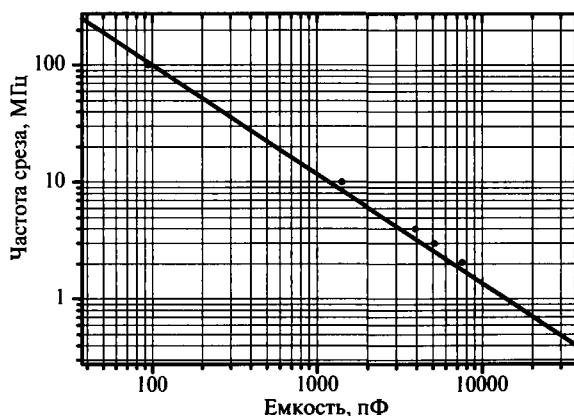


Рис. 14.2. Зависимость частоты среза ФНЧ от его емкости  
• экспериментальные данные

Приведенные выше формулы и данные рисунка 14.2 позволяют оценить  $L$  и  $C$  по частоте среза фильтра, пропускающего без искажения импульсы с заданными параметрами. Для пропускания без искажения наносекундных импульсов с верхней частотой 100–200 МГц, фильтр должен иметь электрическую емкость 15–100 пФ.

### 14.4. Вносимое затухание фильтров для цепей управления

На рисунке 14.3 приведены экспериментальные частотные зависимости вносимого затухания  $L$ - $C$ -фильтров с емкостями 20, 50 и 100 пФ и индуктивностью около 0,05 мкГн [102].

Естественно, что однозвенные фильтры с малой емкостью не могут обеспечить такого же высокого уровня вносимого затухания, как фильтры для цепей питания с емкостью более 1500 пФ. Но даже при вносимом затухании 20 дБ помеха ослабляется в 100 раз, а при 30 дБ — в 1000 раз.

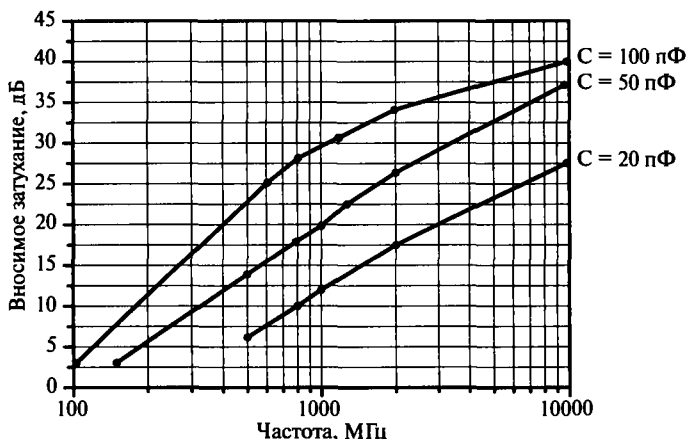


Рис. 14.3. Частотные зависимости вносимого затухания фильтров с емкостями 100 (1), 50 (2) и 20 (3) пФ

### 14.5. Зарубежные фильтры

За рубежом малоемкостные фильтры для цепей управления разрабатывают и выпускают фирмы Spectrum Control [101], Maxwell [106], AMP [112], Tusonix [107], Eurofarad [110] и др. Разработано несколько типов конструкций миниатюрных фильтров:

1. Безрезьбовые, герметизированные металlostеклянным спаем и (или) компаундом фильтры (см. рис. 13.6). В этом исполнении выпускается большая часть фильтров для цепей управления. В большинстве случаев они представляют собой проходные конденсаторы, реже имеют  $L$ - $C$  электрическую схему.
2. Безрезьбовые, герметизированные компаундом, впаиваемые в корпус устройства фильтры (рис. 13.7).
3. Резьбовые фильтры, герметизированные с обоих концов компаундом (см. рис. 13.8).

## 4. Резьбовые фильтры, герметизированные металlostеклянным спаем.

На долю миниатюрных герметизированных фильтров приходится менее одной трети от количества всех типов и типоразмеров фильтров, выпускаемых зарубежными фирмами [104]. Малоемкостные миниатюрные фильтры для цепей управления составляют менее 10% от общего количества миниатюрных фильтров. При этом необходимо учесть, что герметичность фильтров, герметизированных компаундами, не регламентируется. Герметичными (со скоростью натекания  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с) являются лишь безрезьбовые и небольшое число резьбовых фильтров, герметизированных металlostеклянным спаем.

Основные параметры зарубежных фильтров представлены в таблице 14.1.

Таблица 14.1. Основные параметры зарубежных фильтров

№ п/п	Обозначение фильтра	Тип конструкции	Емкость, пФ	Вносимое затухание, дБ, на частотах, МГц				Особенности конструкции	
				100	300	1000	10000		
SPECTRUM CONTROL									
С-фильтры									
1	SCI-9920-101	рис.13.6,а	100	3	10	20	28	-	
2	SCI-9920-101T			рис.13.6,б					
3	SCI-9920-101R								
4	SCI-9110-100	рис.13.8 резьба 4-40 UNC	10	-	-	10	10	S = 3,96, d = 0,81	
5	54-862-001		100	-	10	20	25	S = 3,18, d = 0,81	
6	547900001X5F101M			3	10	20	28		
7	54-862-002	рис.13.8 резьба 6-32 UNC	10	-	-	10	10	S = 3,96, d = 0,81	
8	54779001X5F100M		100	-	10	20	20	S = 4,75, d = 0,51	
9	54713001X5F101M	рис.13.8 резьба 8-32 UNC	100	-	10	20	20		
Л-С-фильтры									
10	54713001X5F101M	рис.13.8	100	-	10	20	20	S = 4,75, d = 0,51	
11	SCI-9920-101	резьба 8-32 UNC		3	10	20	25	S = 4,75, d = 0,81	
Р1-фильтры									
12	51-762-006	рис.13.8 резьба 8-32 UNC	65			16	42	-	
MAXWELL									
С-фильтры									
1	1210-FE7-100S	рис.13.6,а	10	-	-	5	20	Длина корпуса на рис.13.6, а – 1,7 мм; на рис.13.6, б – 5,1 мм;	
2	1212-FE7-100S	рис.13.6,б							
3	1210-FE7-101S	рис.13.6,а	100	3	10	20	40		
4	1212-FE7-101S	рис.13.6,б							
Л-С-фильтры									
5	1230-FE7-100S	рис.13.6,а	10	-	-	5	20		
6	1232-FE7-100S	рис.13.6,б							
7	1230-FE7-101S	рис.13.6,а	100	3	10	20	40		
8	1232-FE7-101S	рис.13.6,б							
TUSONIX									
С-фильтры									
1	4300-008	рис.13.6,а	10	-	-	5	20	-	
2	4300-028	рис.13.6,б							
3	4302-008	рис.13.6,в							
4	4300-009	рис.13.6,а	25	-	-	10	25	-	
5	4300-029	рис.13.6,б							
6	4302-009	рис.13.6,в							



**Таблица 14.1. Продолжение**

№ п/п	Обозначение фильтра	Тип конструкции	Емкость, пФ	Вносимое затухание, дБ, на частотах, МГц				Особенности конструкции
				100	300	1000	10000	
7	4300-000	рис.13.6,а	100	3	-	20	28	-
8	4300-050							
9	4305-001							
10	4300-020							
11	4300-060							
12	4302-000	рис.13.6,в						
13	4400-008	рис 13 8 резьба 4-40 UNC	10	-	-	5	20	S=3,96, d=0,51
14	4400-038							S=3,96, d=0,76
15	4403-008							S=3,18, d=0,51
16	4403-038							S=3,18, d=0,76
17	4400-009		25	-	-	10	25	S=3,96, d=0,51
18	4400-039							S=3,96, d=0,76
19	4403-009							S=3,18, d=0,51
20	4403-039							S=3,18, d=0,76
21	4400-000							S=3,96, d=0,51
22	4400-030							S=3,96, d=0,76
23	4403-000							S=3,18, d=0,51
24	4403-030							S=3,18, d=0,76
25	4400-076	рис 13 8 резьба М3,5х0,5	100	3	-	20	28	S=4,0, d=0,79
26	2430-003-X5F0-101M	рис 13 8 резьба 6-32 UNC						S=3,96, d=0,63
27	2425-018-X5U0-101M	рис 13 8 резьба 8-32 UNC						S=4,75, d=1,29
28	2425-544-X7R0-101M							
<b>L-С-фильтры</b>								
29	4400-050	рис 13 8 резьба 4-40 UNC	100	3		20	33	S=3,96, d=0,51
<b>Pi-фильтры</b>								
30	4205-002	рис 13,8 резьба 8-32 UNC	65	3		16	45	S=4,75, d=1,02
31	4205-018		65					
32	4201-048		100					
<b>EUROFARAD</b>								
<b>C-фильтры</b>								
1	FC030.3.101 HTY	рис.13.6,а	100	3	-	10	22	-
2	FC030.3.101 HTRY							
3	FC030.3.101 HTRX							
4	FC035 3 101 CR	рис.13,8, резьба 6-32 UNC	100	-	12	22	-	d = 0,8 мм
5	FC035 3 101 IR	рис 13,8, резьба М6х0,6						
6	FC035 3 10 YR	рис 13,8, резьба М3,5х0,35						
7	FC035 3 101 UR	рис.13,8, резьба 6-40 UNF						
8	FC0401.102 IR	рис.13,8 М4х0,7	100	-	12	22	-	d = 0,8 мм
9	FC0401.102 IR	рис 13 8, резьба 6-40 UNF						
10	FC0401.102 IR	рис 13,8, резьба 8-32 UNC						
11	FC0401.102 IR	рис 13 8, резьба М4х0,7						

Таблица 14.1. Окончание

№ п/п	Обозначение фильтра	Тип конструкции	Емкость, пФ	Вносимое затухание, дБ, на частотах, МГц				Особенности конструкции
				100	300	1000	10000	
Р1 - фильтры								
12	1099 SR	рис 13 7,а	100	3		35		Диаметр корпуса – 3 мм, длина – 9,5 мм, диаметр проводника 0,8 мм
АМР								
1	859656-1	рис 13 7,в	50–174	-	-	16	42	Частота среза всех фильтров 150 МГц
2	859653-1		80–125					
3	859668-1							
4	859665-1							
5	859659-1	рис 13 8 резьба 8-32 UNC	50–174					S = 4,78 мм, d = 1 мм
6	859671-1		80–125					

Рабочий ток фильтров 5–10 А, напряжение 50–200 В, сопротивление изоляции – не менее 500 МОм, сопротивление центрального проводника не более 5 МОм, рабочий диапазон температур от -55 до + 125°C. Металлические поверхности фильтров покрыты золотом или серебром. Впаивание фильтров в корпуса устройств производят эвтектическими оловянно-свинцовыми припоями с добавкой серебра или без него при температуре 210–230°C (при пайке в печи) или 260°C (при пайке паяльником).

Зарубежные фирмы выпускают фильтры как для гражданского, так и для военного применения в соответствии с международным стандартом MIL-F-15733.

## 14.6. Отечественные фильтры

Помехоподавляющие фильтры 6 типов серийно выпускают предприятия ОАО НИИ «Гириконд» и ОАО «Кулон», г. С.-Петербург [104, 124]. Из них для применения в цепях управления пригодны только фильтры Б24 с электрической емкостью 43–240 пФ. Кроме того, фильтры для цепей управления разработаны ФГУП «НПП «Исток» [102].

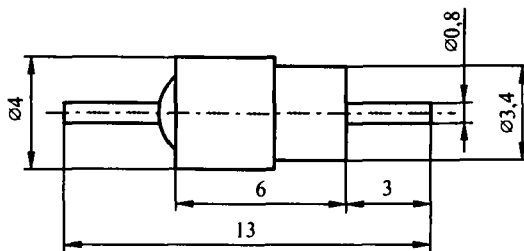


Рис. 14.4. Фильтры КРПГ.433553 005 и КРПГ.433553 005-01

Параметры этих фильтров приведены в таблице 14.2.

**Таблица 14.2.** Параметры отечественных фильтров

№ п/п	Обозначение фильтра	Тип конструк- ции	Емкость, пФ	Вносимое затухание, дБ, на частотах, МГц					Частота среза, МГц	Электрическая схема	
				100	300	500	1000	10000			
ОАО «ГИРИКОНД», ОАО «КУЛОН»											
1	Б-24 АДПК 431145002ТУ	рис. 13 10,а,б	47	2	10	20	36	-	150	Pi	
2			68	3	15	27	42	-	100		
3			150	10	30	42	48	-	40		
ФГУП «НПП «ИСТОК»											
1	КРПГ.433553.005 (КРПГ.433553.005ТУ)	рис. 13 11,а	100	4	17	27	30	40	95	L-C	
2	КРПГ.433553.005-01 (КРПГ.433553.005 ТУ)		50	1,5	8	13	20	30	150		

Фильтры Б24 рассчитаны на номинальное напряжение до 250 В и ток 1 А, их индуктивность 0,03–0,085 мкГн, сопротивление изоляции – более 10 000 МОм, рабочий диапазон температур от -60 до +125°C, срок сохранности 20 лет. При работе в импульсных режимах фильтры Б24 подавляют электромагнитные помехи в диапазоне частот до 10 ГГц.

Фильтры КРПГ.433553.005 (емкость 100 пФ) и КРПГ.433553.005-01 (емкость 50 пФ), разработанные и выпускаемые мелкими сериями ФГУП «НПП «Исток», имеют L-C электрическую схему, выполнены в металлическом корпусе и герметизированы металlostеклянным спаем (рис. 14.4).

В конструкции фильтров не использованы органические материалы. Металлические поверхности фильтров покрыты сплавом палладий-никель.

Основные параметры фильтров представлены в таблице 14.2. Фильтры обеспечивают подавление помех в диапазоне частот до 18 ГГц. Они разработаны на номинальные напряжения 150 В и ток 3 А, их сопротивление изоляции не менее 5000 МОм, рабочий диапазон температур от -60°C до +125°C, срок сохранности 15 лет. Герметичность фильтров –  $1,3 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с. Допустимая температура кратковременного нагрева фильтров при пайке в корпус устройства – 320°C.

# СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

### 15.1. Критерии сравнения

В работах [104, 124] утверждается, что отечественные проходные конденсаторы и фильтры по своим характеристикам практически не уступают зарубежным аналогам, но значительно дешевле их. Из этого следует, что разработчикам изделий микроэлектроники СВЧ нет необходимости использовать дорогостоящие зарубежные фильтры, так как предприятия «Гириконд» и «Кулон» выпускают фильтры более дешевые и не уступающие по параметрам зарубежным.

Так ли это? Насколько полно удовлетворяют требованиям современной микроэлектроники СВЧ серийно выпускаемые отечественные помехоподавляющие фильтры? И какие фильтры окажутся в распоряжении разработчиков через несколько лет?

Сравним отечественные и зарубежные помехоподавляющие фильтры по следующим основным параметрам [125]:

1. Миниатюрность.
2. Герметичность.
3. Величина вносимого затухания в заданном диапазоне частот.
4. Особенности конструкции, допустимая температура нагрева при пайке фильтров в корпуса изделий.
5. Стоимость.

В таблице 15.1 представлены отечественные и зарубежные фильтры, наиболее полно удовлетворяющие этим требованиям.

### 15.2. Миниатюрность

Габаритные и присоединительные размеры и массу фильтра выбирают с учетом размеров корпуса изделия и толщины его стенки, а также общего количества одновременно устанавливаемых фильтров. В модулях СВЧ разных типов требуется от нескольких штук до нескольких десятков фильтров. Толщина стенки корпуса модулей — от 2 до 6 мм. Поэтому желательно применять фильтры с диаметром корпуса не более 4–5 мм, длиной менее 8–10 мм и массой не более 2–3 г.

За рубежом выпускаются в совокупности 8000 типов фильтров [124]. Однако большинство из них не удовлетворяет критерию миниатюрности. Из всех типов серийно выпускаемых отечественных фильтров этому критерию соответствует лишь серия фильтров Б24, варианты а–в.

Таблица 15.1. Параметры миниатюрных отечественных и зарубежных фильтров

Фирма	Номер или серия фильтров	Количество типоразмеров	Электрическая схема	Емкость, пФ	Вносимое затухание, дБ	Особенности конструкции
Отечественные фильтры						
ОАО НИИ «Гирконда», ОАО «Кулон» [119]	Б-24, варианты «а - в» рис 13 10	8 (по номинальной емкости)	P <sub>1</sub>	43—10000	60—65	Безрезьбовые Диаметр корпуса 2,4 мм, длина 10; 12 мм. Диаметр вывода 0,7 мм
	КРПГ, рис 13 11	12	L-C	50—5000	40—55, (50—65 на частоте 18 ГГц)	Безрезьбовые Диаметр корпуса 3,2 и 4 мм, длина 4, 6 и 8 мм Диаметр вывода 0,8 мм
Зарубежные фильтры (рис 13 6, 13.8)						
Eurofarad [110]	FC 030	16	C	100—33000	50—57	Безрезьбовые Диаметр корпуса 3,2 мм, длина 2,8 (С-фильтры), 8,0 мм (L-C, P <sub>1</sub> -фильтры) Диаметр вывода 0,8 мм
	FL 030	8	L-C		60—70	
	FP 030	5	P <sub>i</sub>	10—15000	70	Резьбовые M4×0,7 и 8-32UNC
	FP 040	2				
	1210	8				
Maxwell [106]	1610	6	C	1000—50000	40—45	Безрезьбовые. Диаметр корпуса 3,25 мм, длина 2,79 мм. Диаметр вывода 0,76 мм
	1230	8	L-C	10—15000		
	1630	6	C	4000—50000	35—65	
	4300	13		5—50000		
	Tussonix [107]	4300	13	C	5—50000	
Spectrum Control [101]	SCI-9900	9	C	5—30000	0—45	
	SCI-9910					
	SCI-9920					

**Примечание:** Величина вносимого затухания приведена на частоте 1 ГГц для фильтров с емкостью более 1000 пФ.

### 15.3. Герметичность

Существуют два способа герметизации фильтров:

1. Заливка обоих торцов корпуса фильтра термостойким эпоксидным компаундом. Этот способ использован во всех серийно выпускаемых отечественных фильтрах, включая Б24. Герметичность таких фильтров не регламентируется.

2. Металлостеклянный спай. В этом случае обеспечивается вакуумная плотность фильтра – скорость натекания менее  $10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с. Именно такие фильтры требуется применять в современной герметизированной РЭА СВЧ повышенной надежности и долговечности. Однако в нашей стране они серийно не выпускаются.

Многие зарубежные фильтры, герметизированные металлостеклянным спаем, имеют большую электрическую емкость (от десятых долей до нескольких микрофард) и вследствие этого эффективно фильтруют электромагнитные помехи с частотами более 10 кГц. Однако они велики по размерам и массе, и поэтому в микроэлектронике СВЧ применяются ограниченно. Миниатюрные фильтры выпускают зарубежные фирмы: Maxwell, Spectrum Control, Tusonix, Eurofarad.

### 15.4. Вносимое затухание в заданном диапазоне частот

Для корректного сравнения отечественных и зарубежных фильтров по величине вносимого затухания методика его измерения должна быть одинаковой. Между тем величину вносимого затухания отечественных фильтров Б24 (а также и всех других серийно выпускаемых фильтров) определяют в измерительной схеме с волновым сопротивлением 75 Ом. Зарубежные производители фильтров определяют вносимое затухание только в 50-Омной измерительной схеме. По-видимому, имеются и другие различия в методиках измерения. Известно, например, что зарубежные измерители КСВ и ослабления обеспечивают измерение величины вносимого затухания 60 дБ и более, а существующие отечественные – менее 40 дБ. Не этим ли объясняется низкая, по сравнению с зарубежными данными, величина вносимого затухания (35–45 дБ) фильтров Б7-2, Б14, Б23А? И чем подтверждается достоверность величины вносимого затухания 65–70 дБ для фильтров Б24? Эти вопросы авторы работ [104, 124] оставляют без ответа.

Несмотря на это замечание, сравним вносимое затухание отечественных и зарубежных фильтров. Разработанные в нашей стране Р1-фильтры типа Б24 являются наиболее перспективными. Создана серия фильтров с номинальной емкостью от 43 до 10 000 пФ и индуктивностью от 0,03 до 1,8 мкГн. Величина вносимого затухания на частоте 10 ГГц достигает 65–70 дБ. Частота среза для фильтров с емкостью 10 000 пФ равна 0,7 МГц. Предельная рабочая частота фильтров Б24 равна 10 ГГц.

Статистический анализ параметров большого количества зарубежных фильтров показывает, что при емкости 100 пФ частота среза равна 100 МГц, при емкости 1500 пФ — 10 МГц и при емкости 10 000 пФ — менее 1 МГц. Уровень вносимого затухания зарубежных фильтров на частотах более 1 ГГц достигает 60–70 дБ. Их предельная рабочая частота 10–18 ГГц.

Можно считать, что в диапазоне частот до 10 ГГц по комплексу электрических параметров отечественные фильтры Б24 действительно не уступают зарубежным аналогам.

### **15.5. Особенности конструкции фильтров. Допустимая температура нагрева при пайке в корпусе изделий**

Конструкция всех серийно выпускаемых отечественных фильтров, основы которой разработаны еще в 60-х годах прошлого века, имеет две отличительные черты:

1. Керамический трубчатый конденсатор является элементом корпуса фильтра Б24 (варианты «а» и «б»). В фильтре Б24 (вариант «в») на конденсатор припаяна резьбовая втулка, служащая элементом крепления и для отвода помех «на землю» [124], но это принципиально не меняет сути конструкции.

2. Герметизация фильтров выполнена эпоксидным компаундом.

3. Покрытие металлических поверхностей фильтров — сплав олово-висмут.

В связи с этим монтаж фильтров в корпуса изделий допускается только вклеиванием или низкотемпературной пайкой припоями типа ПОСК50-18 (температура плавления 145°C) паяльником с температурой жала  $200 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение менее 4 секунд. При этом недопустим перегрев более чем на  $10^\circ\text{C}$ . Соединение выводов фильтров с электрической схемой необходимо выполнять пайкой припоями ПОСК50-18 или ПСрОС-58, причем рекомендуется применять теплоотвод от контактного узла фильтра. Перегрев приводит к размягчению компаунда и смещению вывода, а также к возникновению трещин в керамическом корпусе фильтра, что хорошо известно тем, кто имел дело с отечественными фильтрами.

При монтаже фильтров необходимо соблюдать осторожность. Изгибающие нагрузки, крутящие моменты более 0,025 кгс·м и удары приводят к образованию трещин и сколов керамики и могут вывести фильтры из строя [104, 124].

Многих этих недостатков можно было бы избежать, если бы подобно зарубежным фирмам изготавливать фильтры в металлических корпусах и осуществлять их герметизацию металlostеклянным спаем.

Зарубежные фильтры, выпускаемые разными фирмами, близки по своим конструктивным и электрическим параметрам. Фильтры герметизированы с одного торца металlostеклянным спаем. Противоположный торец

герметизирован термостойким компаундом. Кратковременный (не более 6 секунд) нагрев фильтров при пайке в корпусе изделий до температуры  $275 \pm 5^\circ\text{C}$ . Металлические корпус и вывод фильтра покрыты серебром или золотом.

В отечественных и зарубежных фильтрах применены миниатюрные керамические трубчатые и многослойные дисковые конденсаторы. Так как конденсаторы в значительной степени определяют основные параметры фильтров, обычно фирмы-изготовители фильтров имеют собственное керамическое производство. Уровень технологии изготовления конденсаторов в нашей стране и за рубежом можно оценить, например, по точности их размеров.

В таблице 15.2 приведены размеры и допуски на них отечественных и зарубежных миниатюрных конденсаторов. Эти данные не нуждаются в комментариях. Ясно только, что конденсаторы ОАО «Кулон» с таким большим разбросом наружного и внутреннего диаметров непригодны для установки (впаивания) в герметичные металlostеклянные корпуса.

**Таблица 15.2.** Точность размеров многослойных дисковых и трубчатых конденсаторов

Фирма	Многослойные дисковые конденсаторы			Трубчатые конденсаторы		
	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина, мм	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм
ОАО «Кулон» [126]	$4 \pm 0,5$	$1,3^{+0,3}_{-0,45}$	3	$2,4^{+0,1}_{-0,02}$	$1,5^{+0,15}_{-0,005}$	8,0
	ОЖО.460 199ТУ			ФАЦТ 673511.001ТУ		
РУНПП «Монолит» (Белоруссия) [127]	—			$2,6^{+0,05}_{-0,05}$ $1,8^{+0,05}_{-0,05}$	$1,8^{+0,05}_{-0,05}$ $1,3^{+0,05}_{-0,05}$	7,5
				УБО 128.100ТУ		
				Неметаллизированные трубки		
Spectrum Control [101]	$2,54 \pm 0,127$ $3,35 \pm 0,127$ $4,95 \pm 0,127$	$1,0 \pm 0,127$ $1,0 \pm 0,127$ $1,57 \pm 0,127$	1,0 1,5 1,8	$1,83 \pm 0,08$ $2,06 \pm 0,08$ $2,41 \pm 0,08$	$1,19 \pm 0,05$ $0,94 \pm 0,05$ $1,19 \pm 0,05$	8,4 10,8 11,43
Maxwell [106]	$2,03 \pm 0,127$ $2,54 \pm 0,127$ $3,30 \pm 0,127$ $4,83 \pm 0,127$	$0,5 \pm 0,08$ $0,81 \pm 0,08$ $1,0 \pm 0,08$ $1,15 \pm 0,08$	1,0 1,15 1,5 1,8	—		

## 15.6. Стоимость фильтров

Стоимость фильтра Б24 — менее 2 долларов США. Стоимость зарубежных фильтров разных фирм в зависимости от назначения фильтра, сложности его конструкции и объема поставляемой партии, по имеющимся у автора данным, составляет от 1,5 до 10 долларов. Для изделий микроэлектроники СВЧ желательно применение фильтров, соответствующих военным стандартам. Такие фильтры, естественно, стоят дороже.



### 15.7. Альтернатива миниатюрным герметичным зарубежным фильтрам

Более 15 лет предприятие ФГУП «НПП «Исток» разрабатывает и выпускает миниатюрные герметичные L-C-фильтры в металlostеклянных корпусах (см. табл. 15.1). Необходимость их разработки была вызвана отсутствием отечественных серийно выпускаемых фильтров, удовлетворяющих требованиям современной микроэлектроники СВЧ.

Для изготовления конденсаторов в разработанных фильтрах применены точные трубки из керамики T10 000 (группа Н90) и T150 производства РУНПП «Монолит» (табл. 15.2). В конструкции фильтров не использованы органические материалы, металлические поверхности корпуса и вывода фильтра покрыты сплавом палладий-никель. Благодаря этому допустимая температура кратковременного нагрева фильтров при пайке равна 320°C. Это обеспечивает большие возможности применения ступенчатой пайки при сборке изделий.

Предельная рабочая частота фильтров — 18 ГГц, а их электрические параметры соответствуют параметрам зарубежных аналогов.

Разработанные фильтры предназначены для обеспечения разработок и собственного производства предприятия. Но кроме этого, они поставляются небольшими партиями еще 25 предприятиям электронной техники. Годовой объем выпуска фильтров сравнительно невелик — до 25 тыс. шт., поэтому их стоимость высока. Однако высокая стоимость оправдана высоким качеством фильтров. К сожалению, перспектива промышленного выпуска разработанных фильтров пока не просматривается.

### 15.8. Оценка основных направлений разработок промышленных фильтров

Эти направления сформулированы в работе [124]:

1. Применение для конденсаторов фильтров новых термостабильных керамических материалов.
2. Создание фильтров с номинальным напряжением до 1000 В и током до 200 А.
3. Разработка С и L-C-фильтров в металлических корпусах, подобных зарубежным Bolt-in-Filters.
4. Создание многозвенных фильтров, фильтров для «наплатного» монтажа и с варисторной защитой.

Из этих направлений для микроэлектроники СВЧ наибольший интерес представляют первое и третье. Актуальность создания и применения новых термостабильных материалов для конденсаторов несомненна. Вопрос лишь в том, будут ли выпускаться из этих материалов достаточно дешевые мини-

атиорные трубчатые и многослойные дисковые конденсаторы с точными размерами. Важно также, что планируется разработка фильтров в металлических корпусах. Но что понимается под зарубежным прототипом «Bolt-in-Filters»? Ведь обычно это резьбовые фильтры, герметизированные компаундом [101]. Их более точное название — «Resin Style Bolt-in-Filters» или «Bolt Style Epoxy Seals». Хотелось бы, чтобы в качестве прототипа были выбраны «Bolt Style Hermetic Filters» [101] — резьбовые фильтры, герметизированные металло-стеклянным спаем. Если этого не сделать, то в ближайшие годы в нашей стране не появятся промышленные миниатюрные герметичные фильтры, и останутся проблемы, связанные с этим.

## 15.9. Подводя итоги

1. Из всех серийно выпускаемых отечественных фильтров для микроэлектроники СВЧ конкурентоспособными с зарубежными аналогами являются только фильтры типа Б24.
2. Фильтры Б24 дешевле зарубежных аналогов и не уступают им по ряду основных параметров: миниатюрности, номинальной электрической емкости, величине вносимого затухания в диапазоне частот до 10 ГГц.
3. Миниатюрные зарубежные фильтры, герметизированные металло-стеклянным спаем, превосходят фильтр типа Б24 по следующим показателям: герметичность, допустимая температура кратковременного нагрева, меньшая повреждаемость при установке и пайке в изделия.
4. Еще не настало время отказаться от применения зарубежных фильтров в отечественных разработках. Выбор отечественного или зарубежного фильтра остается за разработчиками конкретных изделий микроэлектроники СВЧ. Несомненно только, что отечественная микроэлектроника СВЧ должна базироваться на отечественных компонентах, в том числе и фильтрах, но с параметрами, не уступающими зарубежным аналогам.

### УСТАНОВКА РАДИОКОМПОНЕНТОВ В ИЗДЕЛИЯ С МИКРОПОЛОСКОВЫМИ ЛИНИЯМИ

Технологический процесс установки радиокомпонентов в корпуса изделий включает:

1. Монтаж в корпус изделия.
2. Соединение выводов радиокомпонентов с элементами электрической схемы [23, 25].

#### 16.1. Монтаж радиокомпонентов

Применяемые способы монтажа должны обеспечить надежный электрический контакт корпуса радиокомпонента с корпусом изделия, необходимую механическую прочность крепления и исключение резонансных явлений при воздействии вибраций. Для обеспечения правильного монтажа необходимо комплексно решить следующие задачи:

1. Определить способ герметизации радиокомпонента.
2. Выбрать оптимальную конструкцию посадочного места в корпусе.
3. Подобрать оптимальные покрытия, режимы пайки и т.д.

#### СПОСОБ ГЕРМЕТИЗАЦИИ

В зависимости от конструкции радиокомпонента и корпуса изделия, а также требований к герметичности соединения и ремонтпригодности герметизацию производят одним из следующих способов:

- резьбовым соединением с применением уплотняющих прокладок,
- вклеиванием электропроводящим клеем,
- низкотемпературной пайкой,
- сваркой.

Для современных герметизированных изделий микроэлектроники СВЧ наиболее надежный способ герметизации – низкотемпературная пайка. Пайка обеспечивает:

- достаточную механическую прочность соединения,
- высокую степень его герметичности (скорость натекания гелия через спаи – менее  $10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с),
- наиболее надежный электрический контакт,
- отсутствие повреждаемости самих радиокомпонентов,

- высокую производительность (при применении групповой пайки),
- незначительное выделение вредных газообразных соединений, ухудшающих параметры активных элементов схемы,
- невысокую степень деградации и старения соединения.

## 16.2. Область перехода с МПЛ на КМПП или СВЧ-ввод

Переход с микрополосковой линии на коаксиально-микрополосковый переход или СВЧ-ввод является наиболее критичным при разработке изделий микроэлектроники СВЧ. Именно здесь возникает наибольшее число проблем соединения, определяющих выходную мощность изделий, потери СВЧ, КСВН «вход–выход». Опубликованные в последние годы работы, посвященные этой тематике, содержат главным образом теоретические расчеты области перехода для частот выше 50 ГГц. В то же время подавляющее большинство изделий микроэлектроники предназначено для работы на частотах не более 18 ГГц.

Ряд практических рекомендаций по применению КМПП в изделиях сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн приведен в работах [128, 129]. В работе [128] показано влияние правильности изготовления области перехода с МПЛ на КМПП на параметры согласования в зависимости от частоты (рис. 16.1).

В действительности картина бывает еще более контрастной. Неточность установки платы с МПЛ относительно КМПП, зазор между торцом платы и стенкой корпуса, разброс размеров перемычек, соединяющих полосок с центральным проводником КМПП, и другие факторы, рассмотренные ниже, могут ухудшать КСВН до величины более 2 и увеличивать вносимые потери до 0,5 дБ на частотах выше 12 ГГц [130].

При этом считается [131], что максимальная величина обратных потерь 20 дБ (КСВН равен 1,22) в диапазоне частот до 26,5 ГГц уже является достаточ-

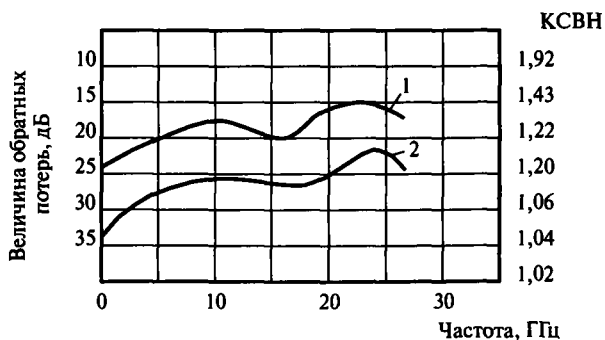


Рис. 16.1. Типичные частотные зависимости величины обратных потерь (КСВН) для оптимального (1) и неоптимального (2) перехода с МПЛ на КМПП

ной гарантией эффективного перехода СВЧ-энергии с МПЛ на радиочастотный кабель, так как отражение проходящей мощности не превышает 1%.

В области перехода на относительно коротком расстоянии должно происходить превращение ТЕМ-волны, распространяющейся в коаксиальной линии, в квази ТЕМ-волну в МПЛ. Задача конструктора — создать такое соединение центрального проводника КМПП с полоском МПЛ, а наружного проводника КМПП — с корпусом изделия, которое обеспечивало бы оптимальные параметры согласования, имело достаточную механическую прочность и было устойчиво к воздействию внешних факторов.

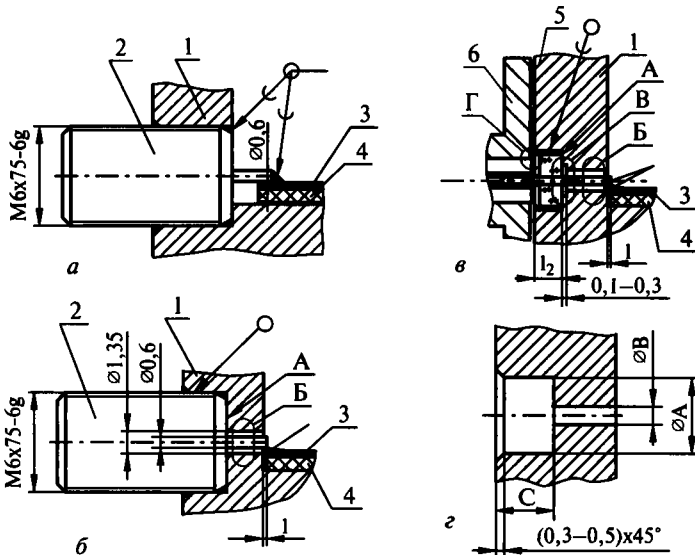
Проблему осложняет и то обстоятельство, что разработчики изделий нередко занимаются конструированием выводов СВЧ-энергии в последнюю очередь, часто просто заимствуя их из предыдущих разработок. Между тем конструирование СВЧ-выводов и их соединение с электрической схемой изделия — достаточно сложная и трудоемкая самостоятельная задача.

### 16.3. Установка КМПП в корпус изделия

На рисунке 16.2 приведены примеры неправильной и правильной установки КМПП и платы с МПЛ в корпусе изделия. На рисунках 16.2, *а* и *б* показаны стандартные КМПП типа СРГ-50-751ФВ; на рисунке 16.2, *в* — составной КМПП, в который входят металlostеклянный СВЧ-ввод и собственно соединитель (СВЧ-разъем). Металlostеклянный ввод обеспечивает герметичность корпуса и жесткость крепления центрального проводника КМПП. Благодаря вводу хрупкое соединение с МПЛ не повреждается при перемещении соединителя или его замене. Однако применение составного КМПП требует высокой точности изготовления корпуса изделия и усложняет технологию сборки.

При конструировании корпуса изделия необходимо учитывать, что на всем протяжении коаксиальная линия должна иметь волновое сопротивление 50 Ом. Изменение диаметров ее наружного или внутреннего проводников, а также область стыковки диэлектриков, обладающих различной диэлектрической проницаемостью, ухудшают КСВН.

Как правило, толщина корпуса в месте установки ввода превышает длину наружного проводника ввода. Поэтому для лучшего согласования в стенке корпуса изделия выполняют воздушную переходную секцию *Б* с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 16.2, *б–в*), представляющую собой отрезок воздушной коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Ее диаметр *В* (рис. 16.2, *г*) рассчитывают по известному соотношению  $B = 2,3 d$ . При диаметре *d* центрального проводника 0,6 мм диаметр *В* равен  $1,35^{+0,06}$  мм, при *d* = 0,5 мм диаметр *В* равен  $1,15^{+0,06}$  мм. Подчеркнем, что в расчетах коаксиальных линий следует брать номинальный диаметр плюс половину допуска на него и учитывать толщину покрытия.



$\varnothing A = (\varnothing D_1 + 0.1)^{+0.02}$ ,  $\varnothing B = 2,3d^{+0.05}$ ,  $C = {}_{12}^{+0.05}$ , мм ( $d$ ,  $D_1$  и  $L$  – см. рис. 3.1)

Рис. 16.2. Неправильная (а) и правильные (б, в) конструкции области перехода на МПЛ с КМПП типа СРГ-50-751ФВ (б) и составного КМПП с металлокерамическим вводом (в), посадочное место под СВЧ-ввод (г): 1 – корпус изделия; 2 – КМПП; 3 – плата с МПЛ, 4 – основание; 5 – металлокерамический ввод; 6 – СВЧ-разъем

С этой же целью при установке в корпус СВЧ-ввода предусматривают еще и дополнительную переходную ступень *В* (рис. 16.2, в) длиной от 0,1 до 0,3 мм в зависимости от диапазона частот. Аналогичную роль выполняет и «утапливание» стекла относительно торца наружного проводника КМПП или СВЧ-ввода – область *Г* на рисунке 16.2, в.

Рассмотренные переходные секции (16.2, б, в) являются примерами ступенчатого перехода от КМПП к МПЛ. Для получения плавного перехода, обеспечивающего лучшие параметры согласования, применяют следующие способы:

- придание переходной ступени с проходящим внутри нее центральным проводником КМПП конусной формы, плавно сужающейся по направлению к МПЛ [131, 132]. Такая конусная секция должна иметь волновое сопротивление 50 Ом;
- смещение вниз (относительно продольной оси переходной ступени) оси центрального конусного проводника, чтобы он подходил к плоскости платы с МПЛ как можно ближе. Eisenhart (США) запатентовал этот способ в 1981 году [131, 133];
- изменение ширины полоска на конце МПЛ непосредственно под выступающим из корпуса краем центрального проводника КМПП

(введение согласующего четвертьволнового трансформатора) для компенсации неоднородности [128,130];

- удаление участка основания под платой с МПЛ на поверхности раздела коаксиал—МПЛ для уменьшения рассогласующей емкости и введение юстировочного винта непосредственно под выступающим из корпуса концом центрального проводника КМПП [134].

Возможны и другие способы согласования области перехода от КМПП к МПЛ.

На рисунке 16.2, в показаны три области неоднородности. Коэффициент отражения от каждой из этих областей пропорционален величине емкости и частоте. Поэтому с их влиянием следует особенно считаться при работе на высоких частотах. В области Г отражения возникают из-за неточности совмещения ввода с СВЧ-разъемом (для составных соединителей), которая обусловлена эксцентриситетом расположения проводников ввода и разъема, а также допусками на их диаметры.

В областях В и Б скачок емкости происходит из-за различия диэлектрических проницаемостей воздуха ( $\epsilon = 1$ ), диэлектрика (для стекла  $\epsilon = 5,2$ ) и материала подложки ( $\epsilon = 10$ ). Емкостную неоднородность компенсируют при помощи индуктивной секции тракта. Роль индуктивности играют воздушные промежутки, показанные на рисунке 16.2. Сущность компенсации заключается в изъятии на этих участках диэлектрика с высокой (по сравнению с воздухом) диэлектрической проницаемостью. Длина этих промежутков равна нескольким десятым долям миллиметра и, как правило, подбирается экспериментально.

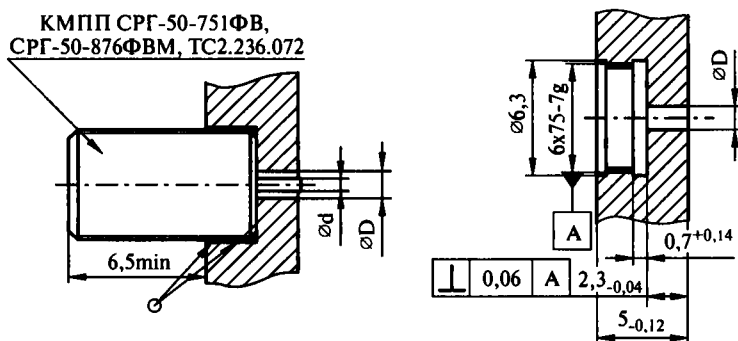


Рис. 16.3. Конструкция и размеры посадочного места под установку КМПП СРГ-50-751ФВ, СРГ-50-875ФВМ и ТС2.236.072 и КРПГ.434511.015

Конструкция и размеры посадочных мест под установку СВЧ-вводов приведены на рисунке 16.2, г, а коаксиально-микрополосковых переходов ФГУП ПО «Октябрь» и ФГУП «НПП «Исток» — на рисунке 16.3 и 16.4.

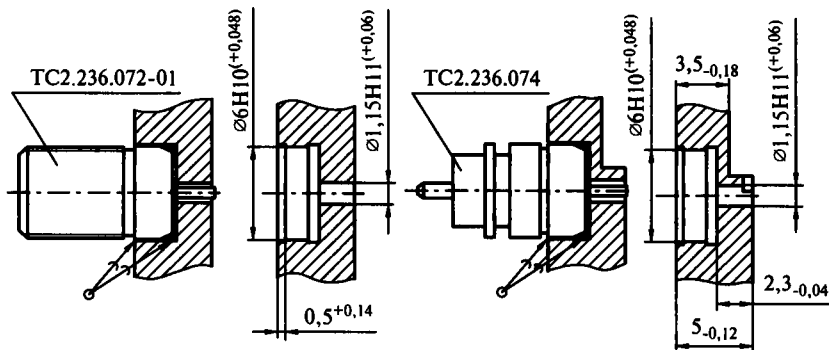


Рис. 16.4. Конструкция и размеры посадочного места под установку КМПП TC2.236.072-01 и TC2.236.074

## 16.4. Установка платы с МПЛ в корпус изделия

Плату с МПЛ припаивают низкотемпературным припоем к дну корпуса. Для изделий с повышенными тепловыми нагрузками ее предварительно припаивают к основанию из высокотеплопроводного металла, например из МД-50 (псевдосплава молибден—медь, получаемого методом порошковой металлургии). Коэффициенты термического расширения основания и платы должны быть согласованы, чтобы свести к минимуму термические напряжения. Но и там, где нет проблем с теплоотводом, плату удобнее устанавливать на металлическое основание, которое затем винтами прикручивать к дну корпуса. Для лучшего контакта с корпусом под основание иногда подкладывают фольгу из индия или припоя.

Правильная установка и пайка платы с МПЛ — важное условие обеспечения требуемых параметров согласования. Прежде всего необходимо получить надежный контакт (малое переходное сопротивление) экранной стороны платы с корпусом. Для этого плата должна быть хорошо пропаяна с основанием или дном корпуса, особенно в области под полосками. Основание должно плотно прилегать к дну корпуса, поэтому они должны изготавливаться с высокой плоскостностью. Кривизна (неплоскостность) основания и платы, особенно в области установки КМПП, ухудшает не только условия теплоотвода, но и параметры согласования из-за удлинения пути заземления.

При конструировании следует строго придерживаться правила: пути заземления должны быть как можно короче, в идеале — нулевой длины [128, 129]. Поэтому при жестких требованиях к КСВН, особенно на высоких частотах, следует по возможности избегать несущих оснований под платами с МПЛ, так как основания удлиняют пути заземления.

Правильное расположение платы в корпусе и полоска МПЛ относительно центрального проводника КМПП играет важную роль для оптимизации параметров согласования. Зазор между торцом платы и стенкой корпуса в об-



ласти установки КМПП должен быть минимальным, как ни трудно выполнять это требование (из-за сложности сборки платы в корпусе и по условиям ее устойчивости к воздействию изменения температуры).

Наличие зазора с физической точки зрения означает введение в радиочастотный тракт с волновым сопротивлением 50 Ом, образованный КМПП и МПЛ, рассогласующей индуктивности и ухудшение вследствие этого КСВН. Зазор может быть недопустимо большим, если:

- длина посадочного места в корпусе чрезмерно превышает длину платы с МПЛ на несущем основании или без него (ошибки при конструировании или изготовлении);
- углы корпуса скруглены, что не позволяет установить плату вплотную к его вертикальной стенке. В этом случае бывает достаточно скруглить нижнюю кромку платы или основания (если плата на основании) и их углы. Этой же цели служит небольшой пропил в дне корпуса (продолжение вертикальной стенки). Однако эти приемы следует применять с известной осторожностью. Они могут привести к ухудшению КСВН из-за удлинения пути заземления, если величина зазора изначально недопустимо велика.

В работе [135] приведены графические зависимости КСВН от частоты, диэлектрической проницаемости материала платы и величины зазора / между торцом платы с МПЛ (без несущего основания) и стенкой корпуса в месте установки КМПП, позволяющие выбирать необходимую величину зазора. Для поликоровой платы эту зависимость можно интерпретировать приближенной формулой:

$$\text{КСВН} \approx 1 + 0,044 / f,$$

где  $f$  — частота, ГГц;  $l$  — величина зазора, мм (см. рис. 16.2, б, в).

Полагая максимальную величину КСВН равной 1,2, легко рассчитать, что при работе на частоте 10 ГГц зазор не должен превышать 0,45 мм, на частотах 18 и 26,5 ГГц — соответственно 0,25 и 0,17 мм.

По нашему же мнению, требования к величине зазора должны быть жестче: на частотах до 18 ГГц он должен быть менее 0,2 мм. Рекомендуемая в работе [129] величина зазора при работе в миллиметровом диапазоне длин волн  $0,1 \pm 0,01$  мм.

## 16.5. Соединение центрального проводника КМПП с МПЛ

В области соединения полоска МПЛ с центральным проводником КМПП необходимо добиваться, чтобы волновое сопротивление было равным 50 Ом, как и на всех других участках тракта. Это обеспечивается выполнением условия:  $L/C = 2,5$  ( $L$  — индуктивность элементов этой области, нГн, а  $C$  — их электрическая емкость, пФ).

Правильное соединение должно отвечать следующим требованиям:

- диаметр центрального проводника КМПП в месте соединения с плоским МПЛ не должен превышать ширины полоска во избежание появления неоднородности в виде краевой емкости;
- соединение должно быть как можно более коротким;
- выступание центрального проводника КМПП из корпуса изделия не должно превышать 0,2 мм. В идеале оно должно быть нулевым;
- расстояние от оси центрального проводника стандартного КМПП типа СРГ 50 751 ФВ до плоскости МПЛ на поликоровой плате толщиной 0,5 мм должно быть не более 0,8 мм [3, 135];
- толщина платы не должна сильно отличаться от половины толщины диэлектрика КМПП в области перехода [136]. Иными словами, желательно, чтобы соотношение размеров коаксиальной линии и платы с МПЛ в области их соединения определялось равенством  $0,5 \cdot (D-d) \approx h$ , где  $D$  — диаметр диэлектрика коаксиальной линии;  $d$  — диаметр центрального проводника КМПП;  $h$  — толщина платы, мм (рис. 16.5, б, в). Для воздушной переходной секции при диаметре центрального проводника, равном 0,6 мм,  $0,5 \cdot (D-d) = 0,38$  мм, что близко к толщине платы (0,5 мм).

Известные способы соединения центрального проводника КМПП с плоским показаны на рисунке 16.5.

#### СОЕДИНЕНИЕ «ВНАХЛЕСТКУ»

Проводник размещается непосредственно на полоске (рис. 16.5, а). Электрический контакт между ними получают сваркой или низкотемпературной пайкой, реже — приклеиванием или механическим прижимом. Последний способ пригоден при изготовлении измерительной оснастки, не подвергающейся воздействию смены температур. Соединение «внахлестку» вносит в электрическую схему емкостное рассогласование, особенно если диаметр проводника превышает ширину полоска. Избыточное ко-

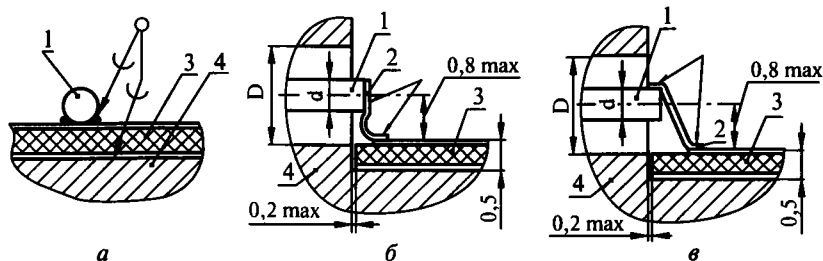


Рис. 16.5. Соединение центрального проводника КМПП с МПЛ: а — «внахлестку», б — плоской перемычкой, в — «Z-соединение». 1 — центральный проводник; 2 — перемычка; 3 — подложка с МПЛ; 4 — корпус

личество расплавленного припоя создает дополнительную емкость. При недостаточном же его количестве снижается прочность соединения. Соединение «внахлестку» нельзя рекомендовать для применения в изделиях микроэлектроники СВЧ, так как под воздействием термоциклов оно подвержено разрушению [137].

### СОЕДИНЕНИЕ ПЕРЕМЫЧКОЙ

При помощи плоской (реже – круглого сечения) тонкой перемычки, соединенной с торцом центрального проводника или обернутой вокруг него, КМПП соединяют с полоском МПЛ пайкой или сваркой (рис. 16.5, б). Вариантом такого соединения является Z-соединение (рис. 16.5, в) [130]. Соединение перемычкой является основным способом в технологии изделий микроэлектроники СВЧ. Хотя перемычка вносит дополнительную индуктивность, соединение все же обеспечивает достаточно высокие параметры согласования вплоть до 50 ГГц.

Плоские перемычки изготавливают из золотой фольги толщиной 0,02 мм или медной фольги, покрытой золотом. Минимально допустимая толщина фольги – 0,015 мм. Круглые перемычки выполняют из золотой или медной, покрытой золотом, проволоки диаметром 0,03–0,05 мм. Для уменьшения индуктивности иногда применяют 2–3 проволочные перемычки. Необходимо, чтобы ширина перемычки не превышала ширины полоска и не отличалась бы от нее более чем на 10%. Смещение перемычки относительно МПЛ не должно превышать 10–15% ширины полоска [135].

При обеспечении этих требований длина перемычки, лежащей на полоске и приваренной к нему, незначительно влияет на КСВН: волновое сопротивление МПЛ уменьшается не более чем на 2% [138, 139]. Важно только, чтобы соединение перемычки с полоском начиналось сразу под торцом центрального проводника КМПП. Недопустимо также наличие полоска под центральным проводником КМПП – «шлейфа», создающего дополнительную емкость на корпус и обуславливающую ухудшение КСВН.

### СОЕДИНЕНИЕ СКОЛЬЗЯЩИМ КОНТАКТОМ

В качестве иллюстрации возможностей разработчиков изделий при конструировании области перехода рассмотрим два новых способа соединения, применяемых за рубежом в устройствах миллиметрового диапазона длин волн [128, 129].

Соединение скользящим контактом является альтернативой соединению «внахлестку». Оно применяется для соединения центрального проводника (диаметром не менее 0,3 мм) СВЧ-ввода и МПЛ с шириной полоска более 0,15 мм на подложке из дюрюида (рис.16.6) [128, 129].

Скользящий контакт, называемый иначе контактом для снятия напряжений, обеспечивает защиту соединения от воздействия температурных, вибрационных и ударных воздействий. Недостатком этого способа является

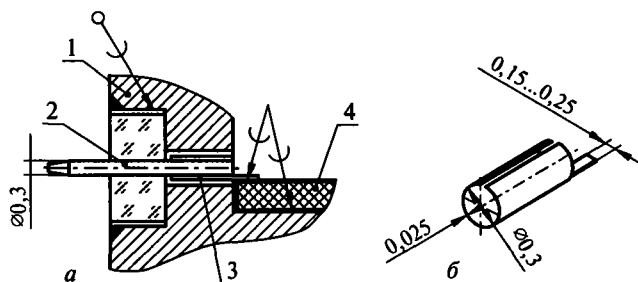


Рис. 16.6. Соединение скользящим контактом (а) и конструкция контакта (б)

сложность изготовления такого миниатюрного контакта и его установки в правильное положение при сборке.

Возможность соединения СВЧ-ввода с МПЛ с применением скользящего контакта была также показана в работе [14].

### СОЕДИНЕНИЕ КОНТАКТОМ «АРБУЗНОЕ СЕМЕЧКО»

Недавно запатентованный контакт, названный «арбузным семечком» (watermelon seed contact), представляет собой миниатюрный конусообразный стержень [128, 129]. Конической частью его вводят в гнездо КМПП, а второй конец стержня прижимается к золотому лепестку, припаянному к полоску и металлизированному торцу подложки с МПЛ (рис. 16.7).

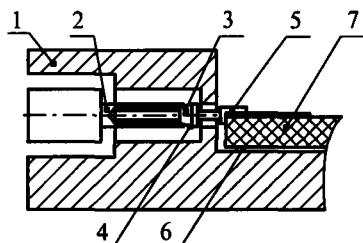


Рис. 16.7. Соединение контактом «арбузное семечко»: 1 — корпус изделия; 2 — гнездо КМПП; 3 — контакт «арбузное семечко»; 4 — поверхность контакта; 5 — золотой лепесток; 6 — окончание экранной металлизации; 7 — подложка с МПЛ

Когда на стержень оказывается осевое давление, его коническая часть раздвигает ламели гнезда, которое при этом стремится вытолкнуть стержень и прижать его обратный конец к лепестку. Эта конструкция предназначена для подложек с МПЛ с удаленной экранной металлизацией в области соединения с КМПП. Ее главное достоинство — отсутствие необходимости пайки, сварки или приклеивания для соединения. Недостатком же является сложность изготовления и установки столь миниатюрного контакта. Кроме того, неизвестно, как поведет себя это соединение при воздействии температурных, вибрационных и ударных нагрузок. В нашей стране контакт «арбузное семечко» до сих пор не применялся.

## 16.6. Результаты экспериментальной проверки

Для проведения экспериментов были использованы герметичные КМПП с волновым сопротивлением 50 Ом и предельной рабочей частотой 18 ГГц [138]:

- фланцевый составной типа КРПГ.434511.016 с каналом 7/3,04 мм в сочетании с СВЧ-вводом;
- КРПГ.434511.015 (аналог СРГ-50-751 ФВ) с коаксиальной линией размерами 4,1/1,27 мм, заполненной фторопластом (канал 3,5/1,52 мм в пересчете на воздушную линию).

Для измерения КСВН применяли два способа:

- неразрушающий, без соединения КМПП с МПЛ, в специальной оправке с подвижной нагрузкой;
- стандартные методики (ГОСТ 20465-85), с установкой КМПП в измерительные оправки с МПЛ. Конструкция измерительных оправок показана на рисунке 16.8.

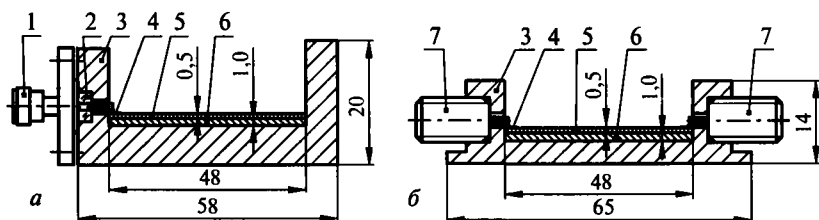


Рис. 16.8. Конструкция оправок для измерения КСВН КМПП 7/3,04 (а) и 3,5/1,52 мм (б): 1 – СВЧ-разъем 7/3,04 мм; 2 – СВЧ-ввод; 3 – корпус; 4 – перемычка; 5 – плата с МПЛ; 6 – основание; 7 – КМПП 3,5/1,52 мм

Измерения проводили при помощи панорамных измерителей КСВ и ослабления в области частот 12–18 ГГц, в которой величина КСВН максимальна. Результаты измерений представлены на рисунке 16.9.

Предварительно был измерен собственный КСВН переходов. Для КМПП 7/3,04 мм измеряли КСВН пары СВЧ-разъемов с вводом между ними (кривая 1 на рис. 16.9, а).

Эти данные позволяют оценить собственный КСВН одного перехода. Максимальный КСВН ориентировочно равен корню квадратному из максимальной величины КСВН пары и не превышает 1,2.

КСВН перехода 3,5/1,52 мм измеряли в специальной оправке с подвижной нагрузкой\*. Усредненные результаты измерений 12 образцов приведены на кривой 1 (рис. 16.9, б). Максимальный КСВН во всем диапазоне частот был менее 1,25.

\* Способ разработан К В Юрьевым

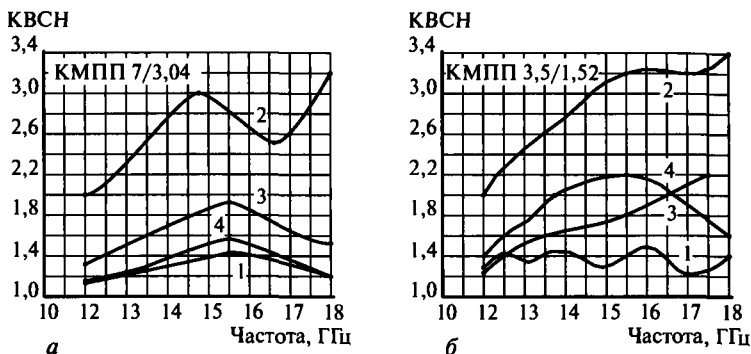


Рис. 16.9. Частотная зависимость КСВН переходов 7/3,04 (а) и 3,5/1,52 мм (б).  
1 – собственный КСВН пары переходов 7/3,04 или одного перехода 3,5/1,52 мм.  
Влияние различных дефектов (кривые 2–4) рассмотрено в тексте

Таким образом, во всем диапазоне частот КСВН КМПП с каналами 7/3,04 и 3,5/1,52 мм не превышал 1,25. После этого КМПП каждого типа были установлены в соответствующие измерительные оправки и проведены измерения их КСВН. СВЧ-ввод КМПП 7/3,04 мм был впаян в корпус оправки с установленной в нее платой с МПЛ на несущем основании, а его центральный проводник соединен с полоском при помощи перемычки. КМПП 3,5/1,52 мм были впаяны в корпус измерительной оправки с двух противоположных сторон и соединены перемычками с МПЛ.

#### КМПП 7/3,04

Кривая 2 на рисунке 16.9, а иллюстрирует влияние на КСВН следующих дефектов области перехода: непропай платы с основанием, неплоскостность основания, наличие «шлейфа», большой зазор между торцом платы и стенкой корпуса (около 0,4 мм), смещение от торца проводника начала соединения перемычки с полоском. Эти дефекты обусловили возрастание КСВН до неприемлемо больших величин. После устранения большинства этих дефектов (кроме большого зазора между торцом платы с МПЛ и корпусом) КСВН значительно уменьшился – кривая 3 (рис. 16.9, а). Устранение зазора привело к дальнейшему снижению КСВН – кривая 4 на рисунке 16.9, а.

#### КМПП 3,5/1,52 мм

Для этих КМПП были получены аналогичные результаты (рис. 16.9, б). Вышеуказанные дефекты установки платы с МПЛ в корпусе и соединения с полоском стали причиной недопустимого возрастания КСВН кривая 2 (рис. 16.9). При измерении КСВН «на проход» в тракте, образованном парой этих КМПП и МПЛ, было установлено, что в отдельных точках частотного диапазона КСВН достигал величины 4,0 (на частоте 15,1 ГГц) и даже 5,0 (на частоте 17,2 ГГц). Устранение большинства дефектов и уменьшение зазора

между платой с МПЛ и корпусом позволило значительно снизить величину КСВН (кривые 3 и 4). Устранение зазора привело к заметному уменьшению КСВН в диапазоне частот 12–16,5 ГГц.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что вышеперечисленные дефекты не удалось устранить полностью. Чтобы привести изделия к величине собственного КСВН КМПП, необходим высокий уровень технологии изготовления корпусов изделий и плат с МПЛ, установки плат в корпуса и соединения КМПП с МПЛ с учетом вышеприведенных рекомендаций. При выполнении этого требования величина КСВН КМПП, установленных в корпусах с МПЛ, согласно нашему опыту, превышает величину собственного КСВН этих КМПП не более чем на 0,1.

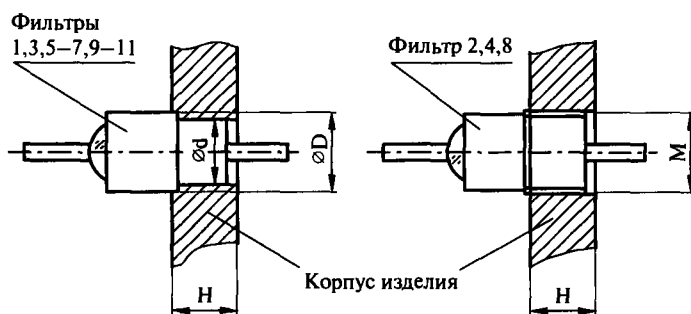
Таким образом, для обеспечения оптимальных параметров согласования конструкция и технология изготовления области перехода с МПЛ на КМПП должны удовлетворять ряду требований. Важнейшие из них – надежные контакты, минимальная протяженность соединения и пути заземления. Для выполнения этих требований необходима высокая точность изготовления корпуса изделия и платы с МПЛ и их взаимного расположения при сборке. Подчеркнем, что трудности соединения МПЛ с КМПП значительно возрастают с ростом частоты. Для миллиметрового диапазона длин волн, где требуется применение тонких (толщиной 0,25 мм) подложек с узкими (шириной 0,25 мм) полосками, проблема согласования электрических параметров усугубляется еще и проблемой обеспечения механической прочности соединения.

### **16.7. Установка фильтров и низкочастотных вводов**

Требования к установке фильтров, низкочастотных вводов и изоляционных стоек проще, чем для СВЧ-радиокомпонентов. Необходимо обеспечить надежный электрический контакт наружных проводников радиокомпонентов с корпусом изделия и механическую прочность соединения. Для применения недостаточно герметичных фильтров в герметизированной аппаратуре иногда используют следующий прием. Фильтры устанавливают в шлюзовой отсек корпуса изделия, а герметичность достигается применением металло-стеклянного ввода, спаиваемого в корпус.

На рисунке 16.10 показаны примеры установки фильтров, а на рисунке 16.11 – низкочастотных вводов и изоляционных стоек, разработанных ФГУП «НПП «Исток» [23].

При использовании фильтров КРПГ.433553.005/01 необходимо учитывать возможность значительного уменьшения сопротивления изоляции при флюсовой пайке в корпуса устройств в результате загрязнения остатками флюса торцевой поверхности конденсатора. После флюсовой пайки необхо-



Припои. ППОС-61 КМА (ХК0.028.005 ТУ), ППВ-190-1 (ТСО 029.023 ТУ)  
 Покрытие корпуса. Хим.Н18.Н1.Пд-Н(80)1; Хим.Н18.0-Ви(99,7)6

Расчеты посадочных мест в корпусах под установку фильтров помех СВЧ

№ п/п	Обозначение	D	d	H	M
1	ТС2.263.017	4,5	3,5 <sup>+0,048</sup>	4–5	-
2	ТС2.263.017-01	-	-		M4x0,5
3	ТС2.263.017-02	4,5	3,5 <sup>+0,048</sup>	6–7	-
4	КРПГ.433533.001	-	-	3–4	M4x0,5
5	КРПГ.433533.001-01	4,5	3,5 <sup>+0,048</sup>		-
6	КРПГ.433533.001-02				-
7	КРПГ.433533.002	3,7	2,7 <sup>+0,04</sup>	3–3,5	-
8	КРПГ.433533.002-01	-	-		M3x0,5
9	КРПГ.433533.002-02	3,7	2,7 <sup>+0,04</sup>	1,5	-
10	КРПГ.433533.005	4,5	3,5 <sup>+0,048</sup>	3–4	-
11	КРПГ.433533.005-01				

Рис. 16.10. Конструкция и размеры посадочных мест под установку фильтров ФГУП «НПП «Исток»

димы тщательная отмывка корпуса устройства с впаянным фильтром от остатков флюса, сушка при температуре 80–120°C и контроль сопротивления изоляции фильтра.

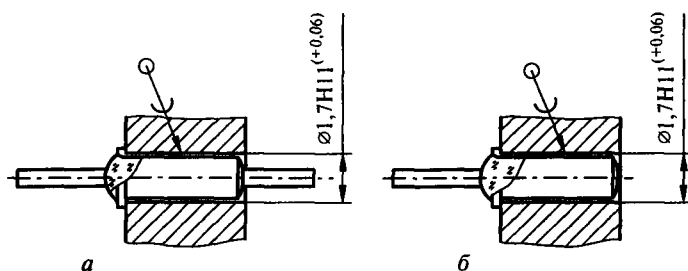


Рис. 16.11. Примеры установки низкочастотных вводов (а) и изоляционных стоек (б)



# ТЕХНОЛОГИЯ УСТАНОВКИ РАДИО- КОМПОНЕНТОВ В ИЗДЕЛИЯ

## 17.1. Технология герметизации

При разработке технологии герметизации необходимо прежде всего по техническим условиям выяснить допустимую температуру кратковременного нагрева радиокомпонента, не приводящую к ухудшению его параметров. Температура пайки радиокомпонента в корпус изделия не должна превышать допустимую температуру нагрева. По этой причине при применении радиокомпонентов, в конструкции которых использованы органические материалы, приходится отказываться от пайки в пользу склеивания (не требующего нагрева до повышенных температур).

Зная предельную температуру нагрева, выбирают необходимый припой. Номенклатура таких припоев ограничена: ПСр 1,5 (температура плавления 273–280°C), ПОС-61 (183°C) и ПОСК 50-18 (145°C), а также паяльные пасты на их основе. Все три припоя эвтектического типа (плавящиеся в узком температурном интервале), что обеспечивает воспроизводимость процесса пайки и высокое качество паяного соединения.

Затем решается вопрос о необходимости применения флюсов при пайке. Подчеркнем, что применение кислотных флюсов в радиоэлектронной технике запрещено. Флюсы устраняют поверхностные окисные пленки, улучшают смачиваемость поверхности и растекаемость по ней припоя. Однако остатки флюса после пайки должны быть полностью удалены. Это не всегда удается в случае «глухих» отверстий и каналов, например, при пайке КМПП и СВЧ-вводов.

Лучшим решением этой проблемы была бы бесфлюсовая пайка, при которой роль флюса выполняет восстановительная среда (водород, формирующий газ), в которой производится пайка. При использовании радиокомпонентов, разработанных ФГУП «НПП «Исток», допускающих кратковременный нагрев до 340°C, была опробована бесфлюсовая пайка припоем ПСр-1,5 в среде водорода. Были получены прочные механические соединения радиокомпонентов с корпусами изделий. После пайки не требовалась химическая очистка области соединения. Однако были нередки случаи непропаев.

Чаще всего применяется бесфлюсовая пайка припоем ПОС-61. Бесфлюсовая пайка требует повышенной температуры (на 50–70°C превыша-

ющей температуру плавления припоя), что не всегда допустимо. К тому же сложно получить высокое качество пайки резьбовых соединений. Требуются меры защиты корпуса радиокомпонента (особенно резьбы) от излишнего растекания припоя, например, при помощи высокотемпературного лака ЭКТ (ЫУО.028.122ТУ)

КМПП и СВЧ-вводы устанавливают в корпусе изделия низкотемпературной пайкой с применением флюса или без него, если пайку производят в защитной среде. На КМПП вилка накидную гайку устанавливают после пайки перехода в корпус изделия. Пайка должна обеспечивать надежный электрический контакт КМПП с корпусом изделия, особенно по торцевой поверхности А (рис. 16.2, б–в), а также необходимую прочность соединения.

Для КМПП типа СРГ-50-751ФВ с резьбой М6×0,75 мм, вворачиваемых в корпус изделия, качественное паяное соединение можно получить только при использовании припойной пасты с флюсом. Резьба не обеспечивает равномерности паяльного зазора, поэтому пайка без флюса с применением колец припоя приводит к его неравномерному растеканию и непропаям. СВЧ-вводы также обычно впаявают в корпус изделия с использованием припойной пасты.

Пайка может внести неоднородности в коаксиальную линию:

- затекание припоя на стенку переходной секции;
- загрязнение этой секции и поверхности стеклянных изоляторов КМПП или СВЧ- ввода флюсом;
- неконтролируемое изменение длины переходной секции (в области А) за счет расплавленного припоя, а также если КМПП был ввинчен в корпус не до упора или с перекосом.

Для флюсовой пайки необходимо применение водорастворимых припойных паст, остатки флюса которых практически полностью удаляются промывкой в воде, строгое дозирование количества припоя и точное соблюдение температурно-временного режима пайки во избежание непропаев или излишнего растекания припоя.

В большинстве случаев отдают предпочтение флюсовой пайке на воздухе или в защитной среде паяльными пастами на основе припоя ПОС-61. Применяемые пасты содержат 75–80% порошкообразного припоя, 2–8% флюсующего компонента, остальное — связующие компоненты. Известны пасты на основе припоя ПОС-61: ППОС-61 КМА-П-1 (ХКО.028.005ТУ), ПП1-180 (АУЭО.033.012 ТУ), ППОС-61-КТП (ОМО.033.002 ТУ) и др. Флюсующий компонент в этих пастах — канифоль, поэтому их активность недостаточна при пайке по никелевым покрытиям при температурах 140–190°C. После пайки этими пастами для удаления остатков флюса необходима тщательная очистка области паяного соединения в органических растворителях (трихлорэтилене, ацетоне, спиртохладонных смесях) обычно с применением ультразвука.

Поэтому и в нашей стране, и за рубежом ведутся работы по созданию бесканифольных водорастворимых экологически чистых паяльных паст повышенной активности. В состав паст вводят от четырех до шести флюсующих и связующих компонентов, что усложняет технологию их приготовления. При использовании таких паст не удастся полностью удалить остатки флюса после пайки промывкой в воде.

Удачным решением проблемы было создание оригинальной [140,141] бесканифольной водорастворимой паяльной пасты ППВ-190 (ТСО.029.023 ТУ). Эта паста содержит всего три компонента, проста в приготовлении и недорога. Она активна при пайке по никелевым покрытиям и обеспечивает получение коррозионностойких и достаточно прочных (40–43 МПа) соединений. Компоненты пасты удобно смешивать на месте потребления непосредственно перед пайкой. Хранение пасты на воздухе при комнатной температуре и относительной влажности окружающей среды  $50 \pm 10\%$  в течение 6 суток не приводит к ухудшению качества лужения и пайки.

Пайку производят при температуре 190–230°C в течение 15–60 с. Остатки флюса после пайки удаляют промывкой в воде с применением ультразвука. Качество отмывки от флюса контролируют по водородному показателю промывной воды индикатором «Рифан» (ТУ6-09-3410-83). После промывки необходима сушка при температуре 80–120°C.

Состав, толщина и качество покрытий паяемых поверхностей важны для получения надежных паяных соединений. Для обеспечения надежной пайки 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. Наиболее часто применяются покрытия сплавами никеля и олово-висмут. На корпуса и выводы радиокомпонентов также наносят одно из покрытий: золото, серебро, сплавы О-Ви (99,7)6, Пд-Н (80)6, (Н-Б)6. Наибольшее применение имеют покрытия золотом, серебром и сплавом олово-висмут.

В производственных условиях покрытия контролируют по их внешнему виду. Толщину покрытия обычно проверяют методом взвешивания образцов-свидетелей. В случае покрытий драгоценными металлами такая проверка обязательна для учета их расхода. Состав же покрытия и прочность его адгезии обеспечиваются только строгим соблюдением технологии подготовительной очистки и покрытия и периодическим контролем состава электролитических ванн. При неудовлетворительной подготовке поверхности и выработке электродитов покрытие обогащается нежелательными примесями. В результате этого ухудшается смачиваемость покрытой поверхности припоем и свариваемость с покрытием (даже золотым). Не случайно поэтому, что зарубежные фирмы, выпускающие радиокомпоненты, уделяют столь серьезное внимание гальваническому производству. В проспектах этих фирм даже сообщается о наличии у них современного теххимического производства.

## 17.2. О директиве RoHS

Нельзя не упомянуть о так называемой «бессвинцовой технологии» пайки радиокомпонентов в корпуса изделий. В ряде промышленно развитых стран набрало силу движение за полный запрет свинца в электронной аппаратуре, даже несмотря на то что его доля в ней – менее 1% от всего добываемого свинца (80,8% приходится на аккумуляторы [142]).

С 1 июля 2006 года вступила в действие европейская директива RoHS (Restriction of Hazardous Substances). Об этой директиве уже написано много [143–146]. Речь идет о запрете к использованию 6 вредных веществ: кадмия, ртути, шестивалентного хрома, полибромина бифенила, полибромина дифенила и главное, свинца.

То, что свинец вреден, известно давно. Свинец – токсичный тяжелый металл, легко абсорбируемый человеческим организмом, что впоследствии приводит к поражению мозга и нервной системы и нарушению репродуктивной функции [143]. Существует комплекс мер безопасной работы с ним. Возможно, нужны еще более жесткие меры. Но решили запретить, поставить забор. Правда, забор оказался с множеством лазеек в виде исключений. Под действие директивы не подпадают продукция военного и аэрокосмического назначения, некоторое медицинское оборудование, различные сплавы со свинцом, покрытия компонентов с малым шагом между выводами и даже припой, где свинца более 85%.

Почему же борьба со свинцом вызывает опасения? Смущает неподготовленность к принятию директивы RoHS. Припоев, равноценных оловянно-свинцовой эвтектике, так и не создано. Большинство бессвинцовых припоев имеют температуру плавления более 217°C (более чем на 30°C выше, чем у припоя ПОС-61). И хотя существует несколько типов бессвинцовых припоев с температурой плавления, приближающейся к температуре плавления припоя ПОС-61, но в их составе содержатся редкие или дорогие металлы (например, индий) и они имеют худшие механические и химические свойства [143–145].

В итоге наибольшее применение нашли бессвинцовые трехкомпонентные припои SAC в системе олово – серебро – медь. Их состав: 95–96% олова, 3–4% серебра и 0,5–1% меди. Температура пайки этими припоями доходит до 260°C, что на 30–40°C превышает температуру пайки припоем ПОС-61. Внедрение этих припоев требует серьезного изменения технологии пайки, включая разработку новых покрытий, термического оборудования, режимов пайки. Однако ведущие зарубежные и отечественные фирмы интенсивно работают в этом направлении.

К тому же выяснилось, что качество пайки припоями SAC хуже, чем свинцовыми припоями. Припои SAC плохо совместимы с покрытиями выводов, содержащими свинец. Оказалось, что лучшим покрытием под пайку бессвинцовыми припоями является олово. Но при этом возникает хорошо

известная, но так и до конца не решенная проблема «вискеров» или «усов» — причины коротких замыканий.

Так, в 1998 году в Северной Америке внезапно прекратили работу около 40 млн пейджеров. Причиной катастрофы явился отказ спутника связи Galaxy 4 стоимостью 250 млн долларов США. Проведенный анализ выявил возможную причину отказа — короткое замыкание в электрической цепи оборудования, вызванное образованием металлического уса [146].

И поэтому вся бессвинцовая технология вызывает опасение ухудшения надежности изделий. Не говоря уже о повышении стоимости изделий, изготовленных по этой технологии. Авторы директивы это понимают. Отсюда и эти многочисленные исключения.

Но как бы то ни было, директива вступила в действие, и с этим нельзя не считаться. Главная опасность здесь — в применении зарубежных микросхем и других электронных компонентов, которые не производит отечественная промышленность. Когда их начнут поставлять в «бессвинцовом» варианте, возникнет много трудностей [143].

И все-таки нет полной ясности: почему надо запрещать свинец в припоях и покрытиях, где его доля в общем потреблении всего-то 0,5%. Говорят о сложности утилизации и повторного использования свинца. Не очень убедительно. В электронной технике почти все вредно. Разве не вредно для здоровья электромагнитное излучение СВЧ-диапазона, лежащее в основе всей СВЧ-техники? Может, и его запретить? Другой пример. За рубежом применяется совершенный процесс — пайка навесных компонентов на печатные платы, осуществляемая в парогазовой среде. В качестве теплоносителя при пайке используют тяжелые (в 20 раз тяжелее воздуха) фторорганические жидкости. Они раздражают кожу и, накапливаясь в помещении, отравляют дыхание операторов. Но не запрещают. Устанавливают жесткие требования к вентиляции и работают. Таких примеров множество.

### **17.3. Соединение выводов радиокомпонентов с элементами электрической схемы**

Соединение центрального проводника КМПП с МПЛ производят при помощи тонких перемычек (рис. 17.1). Область соединения центрального проводника КМПП и СВЧ-ввода с полоском является уязвимым местом при термостатировании [137]. Для предотвращения образования трещин и разрывов в перемычке необходимо предусмотреть компенсационную петлю и не допускать резких перегибов материала.

На рисунке. 17.1, а показан способ соединения, при котором один край перемычки припаивают к полоску, перемычку оборачивают вокруг торца или цилиндрической поверхности центрального проводника и ее второй край припаивают к нему.

Для подстройки согласования применяют способы, показанные на рисунке 17.1, б и в. При настройке изделия удаляют часть перемычки, выступающую над центральным проводником (подстройка емкости) (рис. 17.1, б), или участок отвода на полоске (подстройка индуктивности) (рис. 17.1, в).

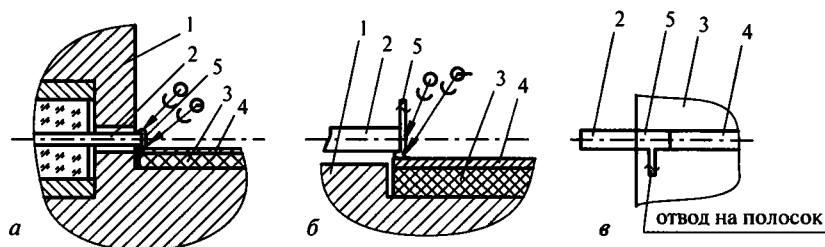


Рис. 17.1. Способы соединения КМПП с МПЛ — а и подстройки согласования — б, в.  
1 — корпус; 2 — центральный проводник КМПП; 3 — подложка с МПЛ; 4 — полосок;  
5 — перемычка

При соединении с электрической схемой радиокомпонентов, герметизированных металлостеклянным спаем, существует опасность нарушения их герметичности из-за образования микротрещин в стеклянном изоляторе. Во избежание этого нельзя допускать:

- попадания на изолятор капель припоя и сварочных выплесков,
- касания его сварочным электродом,
- контактной сварки «на проход» по центральному проводнику при приварке к нему перемычки (можно рекомендовать сварку расщепленным электродом, лазерную сварку или пайку).

Для радиокомпонентов, герметизированных органическими компаундами, следует избегать перегрева центрального проводника при обслуживании и пайке из-за возможности нарушения его крепления в корпусе радиокомпонента. Во всех случаях нельзя допускать изгиба центрального проводника.

### КАК ВЫБРАТЬ РАДИОКОМПОНЕНТ

#### 18.1. Отечественный или зарубежный?

Казалось бы, ответ на этот вопрос однозначен: в отечественных изделиях должны применяться только отечественные радиокомпоненты. Более того, в изделиях военного назначения это обязательное требование. Однако в ряде технически обоснованных случаев приходится все же прибегать к зарубежным радиокомпонентам [76]:

1. При необходимости достижения высокого уровня выходных параметров разрабатываемых изделий. А это невозможно без использования современной элементной базы радиокомпонентов. Основанием для применения является невозможность реализации требуемых технических характеристик изделия на отечественных радиокомпонентах. Не секрет, что зарубежные радиокомпоненты по своим параметрам превосходят отечественные серийно выпускаемые аналоги либо их вообще не имеют.
2. При создании изделий экспортного исполнения, когда требуется применение выходных соединителей (СВЧ-разъемов), адаптированных к зарубежной аппаратуре.
3. При использовании современной зарубежной радиоизмерительной аппаратуры (векторных и скалярных анализаторов спектра, панорамных измерителей КСВ и ослабления и др.), выходные СВЧ-разъемы которой отличаются от отечественных.

В случае применения зарубежных радиокомпонентов в спецтехнике необходимо руководствоваться следующими документами [147]:

1. «Перечень изделий и материалов иностранного производства, разрешенных к применению», выпускаемый 22 ЦНИИ МО.
2. РДВ 319.04.35.00-01 — Положение о порядке применения.
3. РД. 134-0122-2001 — Методические указания. Порядок использования в аппаратуре. Общие положения.
4. РДВ В 319.01-09-94, ред.2.-2000 — Руководство по оценке правильности применения электроизделий и средств измерений в аппаратуре военного назначения.

Основное конструктивное отличие зарубежных соединителей от отечественных аналогов состоит в виде присоединительной резьбы на их корпусах. Отечественные соединители изготавливают с метрической резьбой, зарубежные — с дюймовой.



Как же преодолеть это различие? Радикальное средство – применение адаптеров. На практике применяют также следующие приемы. Если зарубежный соединитель – вилка, то его гайку можно все-таки навернуть на корпус отечественного соединителя розетка, несмотря на различие в шаге резьбы, так как диаметр резьбы на гайке несколько больше, чем на корпусе розетки. Если зарубежный соединитель – розетка, то на него можно навернуть гайку отечественного соединителя вилка, предварительно притупив резьбу на гайке, т.е. увеличив диаметр резьбы. Так нередко поступают при необходимости измерения параметров зарубежного изделия на отечественной измерительной аппаратуре или отечественного изделия на зарубежной аппаратуре. Однако эти приемы следует применять в исключительных случаях и только при отсутствии подходящих адаптеров.

Рынок зарубежных радиокомпонентов огромен. Их выпускают десятки только ведущих фирм США, Европы и Азии. Сайты зарубежных, а также отечественных производителей коаксиальных радиокомпонентов приведены в приложении. В нашей стране появилась развитая сеть фирм-посредников, представляющих зарубежные радиокомпоненты на отечественном рынке. Как же сделать правильный выбор? Можно дать следующие общие рекомендации:

1. Предпочтительны хорошо зарекомендовавшие себя в течение многих лет радиокомпоненты ведущих фирм: M/A-COM, Amphenol, AMP, Spectrum Control, Radiall и др. В большинстве случаев эти радиокомпоненты имеют более высокую цену. Однако стоимость радиокомпонентов несоизмерима со стоимостью устройств СВЧ, в которых они применяются. А цена экономии на радиокомпонентах – снижение надежности выпускаемых изделий и ухудшение репутации их производителей.
2. По возможности следует выбирать радиокомпоненты, соответствующие военным стандартам. Стоимость таких радиокомпонентов и сроки поставки существенно увеличиваются, но это окупается их высоким качеством и надежностью.
3. Прежде чем сделать свой выбор, надо внимательно изучить всю прилагаемую техническую документацию. Может оказаться, например, что стоимость радиокомпонента невелика, но для его применения придется приобрести и дорогостоящий специальный инструмент. Возможно также, что предлагаемый радиокомпонент из-за особенностей конструкции или условий применения непригоден для использования в разрабатываемом изделии.
4. Желательно заказывать сразу большую партию, так как с увеличением объема поставки заметно снижается стоимость радиокомпонентов.



## 18.2. Выбор соединителя

1. Первый шаг — определить конструктивную разновидность соединителя: КМПП, кабельный соединитель, адаптер и т.д., вид разъема — вилка или розетка.

2. С учетом рабочего диапазона частот разрабатываемого изделия и требования к величине КСВН «вход-выход» выбирается тип соединителя. Если предельная рабочая частота менее 18 ГГц, подходящими являются соединители типа SMA и их отечественные аналоги (тип IX, ГОСТ 20265-83 для изделий микроэлектроники СВЧ или ГОСТ 13317-89 — для измерительной аппаратуры). Для более высоких частот применяют зарубежные соединители, например типа K и отечественные — типов I, IX в соответствии с вышеприведенными стандартами.

3. Исходя из конструкции разрабатываемого изделия, определяют конструктивный вариант соединителя, учитывая при этом:

- особенности его установки в корпус изделия,
- допустимую температуру нагрева (в случае пайки соединителя в корпус изделия),
- герметичность (для КМПП и выводов энергии, применяемых в герметизированных изделиях),
- тип радиочастотного кабеля и способ его заделки (для кабельных соединителей).

4. Анализируют параметры надежности соединителя, в том числе допустимое число соединений и рассоединений с ответной частью.

5. Наконец, решающим фактором выбора может стать цена соединителя.

## 18.3. Выбор фильтра

1. Прежде всего следует определить рабочий частотный диапазон фильтра. Для этого надо знать минимальную частоту, начиная с которой фильтр должен подавлять помехи. Эта частота эквивалентна частоте среза фильтра. Таким образом, выбор фильтра следует начинать с определения его частоты среза.

2. Определяют необходимую величину вносимого затухания в рабочем диапазоне частот.

3. После этого выбирают величину электрической емкости фильтра. Для установки в цепях питания постоянного тока следует выбирать фильтры по возможности с большой емкостью. Номинальная емкость должна быть не менее 1500 пФ. Емкость фильтров, используемых в цепях импульсных наносекундных сигналов, не должна превышать 100 пФ.

4. Определяют следующие параметры фильтра:

- номинальные напряжение и ток и их допустимые изменения в условиях эксплуатации,



- показатели надежности, долговечности и сохраняемости,
- сопротивление изоляции,
- герметичность фильтра.

5. Наконец, производят анализ конструктивных особенностей фильтра, включая:

- габаритные, присоединительные и установочные размеры и массу,
- способ монтажа фильтра в корпус аппаратуры (вид соединения с корпусом, допустимая температура нагрева при пайке, требуемая толщина стенки корпуса и др.),
- способ соединения выводов фильтра с элементами электрической схемы,
- условия эксплуатации фильтра (диапазон рабочих температур, относительная влажность окружающей среды, механические нагрузки и др.).

6. Одно из важнейших условий — цена фильтра. При прочих равных условиях более низкая цена может определить выбор фильтра.

Зарубежные радиокомпоненты в обозримом будущем будут применяться отечественными производителями микроэлектроники СВЧ, и от их правильного выбора и применения зависит качество выпускаемой продукции.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Коаксиальные радиокомпоненты – важная неотъемлемая часть элементной базы микроэлектроники СВЧ. На протяжении последних лет их производство дает заметную долю общей прибыли СВЧ-техники и имеет устойчивую тенденцию к росту [148]. В 2000 г. их доля в объеме продаж всех СВЧ-компонентов, включая монолитные интегральные схемы, дискретные СВЧ-элементы, усилители, генераторы и СВЧ- лампы, составляла 17% [149]. За рубежом выпуск коаксиальных радиокомпонентов растет, даже несмотря на некоторое снижение потребности в межсоединениях вследствие миниатюризации и интеграции устройств СВЧ.

Основная тенденция развития этого направления СВЧ-техники – продвижение в область все более высоких частот и повышение надежности. Для прогресса микроэлектроники необходимо, чтобы ее элементная база (коаксиальные радиокомпоненты в том числе) развивалась опережающими темпами. Ведущие зарубежные фирмы вкладывают большие средства в создание все новых и новых радиокомпонентов. К сожалению, в нашей стране этому до сих пор уделяется недостаточное внимание. Промышленность продолжает выпускать морально устаревшие радиокомпоненты, разработанные более 30 лет тому назад и не отвечающие современным требованиям. Отсутствует целевая программа развития коаксиальных радиокомпонентов на ближайшие годы, объединяющая усилия немногих коллективов, работающих в этом направлении. А без создания современной базы коаксиальных радиокомпонентов невозможен прогресс микроэлектроники СВЧ в нашей стране.

\* \* \*

Автор выражает глубокую благодарность Н.А. Бабинцевой и Р.М. Попову за большой труд при подготовке материалов книги к изданию.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## САЙТЫ ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ РАДИОКОМПОНЕНТОВ

№ п/п	КОМПАНИЯ	СТРАНА	САЙТ
<b>ЗАРУБЕЖНЫЕ</b>			
1	M/A-COM, Inc	США	<a href="http://www.macom.com">www.macom.com</a>
2	Amphenol Corp	США	<a href="http://www.amphenol.com">www.amphenol.com</a>
3	AMP Inc. (Tyco Electronics Corp)	США	<a href="http://www.amp.com/communications.com">www.amp.com/communications.com</a>
4	Corning Gilbert Microwave Products	США	<a href="http://www.corning.com/corninggilbert.com">www.corning.com/corninggilbert.com</a>
5	Radiall, Comp.	Франция	<a href="http://www.radiall.com">www.radiall.com</a>
6	Molex RF/Microwave	США	<a href="http://www.molex.com">www.molex.com</a>
7	Southwest Microwave, Inc	США	<a href="http://www.southwestmicrowave.com">www.southwestmicrowave.com</a>
8	SV Microwave, Inc	США	<a href="http://www.svmicrowave.com">www.svmicrowave.com</a>
9	Pasternack Enterprises	США	<a href="http://www.pasternack.com">www.pasternack.com</a>
10	KMW, Inc	Корея	<a href="http://www.kmw.com">www.kmw.com</a>
11	Jonson Components	США	<a href="http://www.jonsoncomponents.com">www.jonsoncomponents.com</a>
12	Huber + Shuner AG	Швейцария	<a href="http://www.hubershuner.com">www.hubershuner.com</a>
13	Rosenberger Co	Германия	<a href="http://www.rosenberger.de">www.rosenberger.de</a>
14	Anritsu Comp	США	<a href="http://www.usaanritsu.com">www.usaanritsu.com</a>
15	SM Electronics	США	<a href="http://www.smelectronics.com">www.smelectronics.com</a>
16	Agilent Comp.	США	<a href="http://www.agilent.com/find/accessories">www.agilent.com/find/accessories</a>
17	Applied Engineering Products, Inc.	США	<a href="http://www.aepconnectors.com">www.aepconnectors.com</a>
18	Jyebao	Китай	<a href="http://www.jyebao.com.tw">www.jyebao.com.tw</a>
19	Eurofarad Comp.	Франция	<a href="http://www.eurofarad.com">www.eurofarad.com</a>
20	Tusonix, Inc	Франция, США	<a href="http://www.tusonix.com">www.tusonix.com</a>
21	Spectrum Control, Inc	США	<a href="http://www.spectrumcontrol.com">www.spectrumcontrol.com</a>
22	MuRata Comp.	Япония	<a href="http://www.murata-europe.com">www.murata-europe.com</a>
<b>ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ</b>			
23	ФГУП НИПИ «Кварц»	Россия	<a href="http://www.kvarz.ru">www.kvarz.ru</a>
24	ОАО ЦНИИИА	Россия	<a href="http://www.cime.ru">www.cime.ru</a>
25	ОАО «Кулон»	Россия	<a href="http://www.kulon.spb.ru">www.kulon.spb.ru</a>
26	ОАО НИИ «Гириконд»	Россия	<a href="http://www.giricond.spb.ru">www.giricond.spb.ru</a>
27	ПО «Монолит»	Белоруссия	<a href="http://www.monolit.vitebsk.by">www.monolit.vitebsk.by</a>
28	НПФ «Микраи»	Россия	<a href="http://www.micran.ru">www.micran.ru</a>
29	НПП «Спецкабель»	Россия	<a href="http://www.spcable.ru">www.spcable.ru</a>
30	ФГУП «НПП «Исток»	Россия	<a href="http://www.istok.ru">www.istok.ru</a>
31	ОАО «Ферроприбор»	Россия	<a href="http://www.rusgates.ru">www.rusgates.ru</a>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ю. Борисов.* Отечественная электронная промышленность и компонентная база. — Электроника: НТБ, 2006, №2 (68), с. 6.
2. Сверхширокополосные микроволновые устройства. Под ред. А.П. Креницкого и В.П. Мещанова. — М.: Радио и связь, 2001. — 560 с.
3. *Ненашев А.П.* Конструирование радиоэлектронных средств. — М.: Высшая школа, 1990. — 432 с.
4. *Лебедев И.В.* Техника и приборы сверхвысоких частот. Том I. Техника сверхвысоких частот. — М.— Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 512 с.
5. *Ефимов И.Е., Останькович Г.А.* Радиочастотные линии передачи. — М.: Связь, 1977. — 408 с.
6. *Милованов О.В.* Техника сверхвысоких частот. — М.: Атомиздат, 1980. — 464 с.
7. Теория линий передачи сверхвысоких частот. Пер. с англ. под ред. А.И. Шпунтова.— М.: Советское радио, 1951 — 259 с.
8. *Кинг Р., Мимно Г., Уинг А.* Передающие линии, антенны и волноводы. Пер. с англ. под ред. С.Я. Турлыгина. — М.: Госэнергоиздат, 1948. — 358 с.
9. *Изюмова Т.И., Свиридов В.Т.* Волноводы, коаксиальные и полосковые линии.— М.: Энергия, 1975. — 112 с.
10. *Воскобойник М.Ф., Черников А.И.* Техника и приборы СВЧ. — М.: Радио и связь, 1982. — 208 с.
11. Weinshel B. Coaxial connectors: a look at the past and future. — Microwave System News, 1990, № 2, p.24.
12. [www.amphenol.com](http://www.amphenol.com).
13. *Browne J.* Precision coaxial cables and connectors reach 45 GHz. — Microwaves and RF, 1983, vol. 22, № 9, p. 131.
14. *Джуринский К.Б., В.Г. Калина, А.Д. Родионов.* Коаксиальный СВЧ-ввод для герметичных модулей на основе гибридно-интегральных схем. — Электроника СВЧ, 1987, вып.7 (401), с.56.
15. Справочные данные на стекла для электровакуумных приборов. — М.: НИИЭС, 1986.
16. *Эсне В.* Технология электровакуумных материалов.— М.: Энергия, 1968. — 632 с.
17. *Sladek N.J.* Основные соображения по расчету и применению прецизионных коаксиальных соединителей. — Зарубежная радиоэлектроника, 1967, № 10, с. 101.
18. Coaxial Connectors, Adapters, Tools and Accessories. Каталог фирмы M/A-COM Omni-Spectra, 1997.
19. Проспект фирмы Southwest Microwave, Inc., 1994.
20. 50-Ohm kovar feedthroughs are now stock items in a range of finishes and configurations. Реклама фирмы Northeast Electronics Corp. — Microwave System News, 1985, vol.15, № 7, p.27.
21. RF/ Microwave Connectors. Каталог фирмы Molex № RF-02, 2003.
22. Subminiature coaxial connectors. Hermetic SMA range. Каталог фирмы Radiall № D1C049 CE, 2005.

23. Джуринский К.Б. Коаксиальные радиокомпоненты нового поколения для микроэлектронных устройств СВЧ. Справочные материалы по электронной технике. — ОНТИ, 1996. — 36 с.
24. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные СВЧ-вводы для микроэлектроники. Конструирование, расчет параметров, применение. — Электроника НТБ, 2000, № 6, с.18.
25. В.С. Савченко, Мельников А.В., Карнишин В.И. Соединители радиочастотные коаксиальные. — М.: Советское радио, 1977. — 48 с.
26. Джуринский К.Б.. Отечественные и зарубежные герметичные миниатюрные коаксиальные СВЧ-компоненты. — Электронные компоненты, 2002, № 4, с. 89.
27. Джуринский К.Б. Путеводитель в мире зарубежных радиочастотных соединителей. — Электронные компоненты, 2006, №5, с. 94.
28. Джуринский К.Б. Техника соединения коаксиально-микрополосковых переходов с микрополосковыми линиями в изделиях СВЧ. — Электронные компоненты, 2004, №9, с. 39.
29. Shuner coaxial connectors. General Catalogue фирмы Huber + Shuner, 2003.
30. Каталог фирмы Anritsu Comp., 2003.
31. Гудин М. Лето — швейцарский производитель коннекторов. Описание продукции партнеров. — Витал электроникс, 2004, с. 3.
32. Guide to RF Connectors. Каталог 82074 фирмы AMP (США), 1994.
33. Джуринский К.Б. Субминиатюрные коаксиальные соединители для СВЧ-микроэлектроники за рубежом. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ — М : ЦНИИ «Электроника», 1987, вып.21 (1320). — 50 с.
34. Борьба за качество разъемов. — Электроника, 1978, № 20, с. 108.
35. Oldfield W.W. Comparing miniature coaxial connectors. — Microwaves and RF, 1985, vol.24, №9, p. 171.
36. Connector relieves nagging SMA measurement problems. — Microwaves, 1979, vol. 18, №1, p. 97.
37. Патент США № 4397515. Center conductor element for female microwave coaxial connector. T.J. Russel. Приоритет от 16.03. 1981.
38. KMC-SL series mm-wave coaxial connectors with sexless center conductor. — Microwave System News, 1985, vol. 15, № 10, p. 131.
39. KMC-SL series mm-wave coaxial connectors. — Microwave Journal, 1985, vol.28, №5, p. 117.
40. Патент РФ № 1764477. Коаксиально-микрополосковый переход. Джуринский К.Б., Бабинцева Н.А., Евсеева И.Ю., Юрьев К.В. Приоритет от 02.01.1990.
41. Электролитическое нанесение металлических покрытий. — Новости СВЧ-техники, 1999, № 3, с. 16.
42. Omni-Spectra Microwave Coaxial Connectors. Каталог фирмы M/A-COM Inc., 1990
43. Brayant J.H. Coaxial transmission lines, related two-conductor transmission lines, connectors and components: historical perspective. — IEEE TRANS., 1984, vol. MTT-32, №9, p. 970.
44. Джуринский К. Соединители SMA. — Электронные компоненты, 2005, № 3, с. 35.

45. *Джуринский К.Б., Тисленко Ю.В.* Миниатюрные коаксиальные соединители SMA, SMB и SMC для радиоэлектронной аппаратуры СВЧ.— Электронные компоненты, 2001, № 1, с. 81.
46. *Maury M.A.* Improving SMA tests with APC-3,5 hardware. — *Microwaves*, 1981, №9, p. 71.
47. *Manz B.* Fear of lightwaves proves shortsighted. — *Microwaves and RF*, 1986, vol.25, № 12, p. 81.
48. *Калинин А., Джуринский К.* Герметичные соединители SMA фирмы Radiall.— Компоненты и технология, 2005, № 6, с. 62.
49. RF coaxial solution for communications. Каталог 1307191 фирмы Tусо Electronics Corp., 2003.
50. [www.svmicrowave.com](http://www.svmicrowave.com).
51. Coaxial fiber optics catalog фирмы Pasternack Enterprises, 2001.
52. SMA and reverse polarity coaxial connectors. Каталог фирмы Amphenol Corp (США), 1996.
53. Short Form Catalog, 95 фирмы Spectrum Elektrotechnik GmbH, (Германия), 1995.
54. RF-Microwave Products. Каталог фирмы KMW (Южная Корея), 1997–1998.
55. Coaxial connectors. Main series catalogs D 1004 BE фирмы Radiall, 2004.
56. *Bruno S.T., Kirkpatrick G.R.* 3,5-mm connectors. A significant improvement over SMA,s in test applications. — *Microwave Journal*, 1979, vol.22, № 4, p. 67
57. RF coaxial precision connectors. Test and measurement applications. Catalog 2 фирмы Rosenberger, 2004
58. Amphenol RF Connectors. RF/Microwave Coaxial Connectors for Industry Standard and Commercial Applications. Каталог фирмы F122-RF/IS-C, 1991.
59. *Adam S.F., Kirkpatrick G.R., Sladek N.J., Bruno S.T.* A new 34 GHz 3,5-mm low cost utility coaxial connector featuring low-leakage, low-standing wave ratio, and long life. — *IEEE Trans.*, 1976, vol. MTT-24, №12, p. 995.
60. APC–3,5 connectors, components, instruments from Maury. — *Microwaves and RF*, 1986, vol. 25, № 12, p. 13.
61. *Калинин А., Сохатюк М., Джуринский К.* Миниатюрные, микроминиатюрные и ультраминиатюрные соединители фирмы Radiall для микроэлектроники. — Электронные компоненты, 2004, № 4, с. 85.
62. *Джуринский К.Б.* Коаксиальные соединители для диапазона частот 34...110 ГГц.— Электронные компоненты, 2001, № 6, с. 38.
63. [www.anritsu.com](http://www.anritsu.com).
64. 2002 Microwave products catalog фирмы Corning Gilbert. GPOTM и GPPOTM push-on.
65. *Microwave Journal*, March 2004 issue. 2004 Horizon House Publication Inc.
66. *Botka K., Watson P.* A complete «Multi-Grade Solution» in coaxial connections to 50 or 65 GHz. — 16-th Eur. Microwave Conf. Dublin, 8...12 Sept., 1986, Conf. Proc., p. 127.
67. *Browne J.* Mm — wave connectors push into Q — band. — *Microwaves and RF*, 1986, vol. 25, № 12, p. 99.
68. *Kachigan K., Botka J., Watson P.* The 2,4 — mm connector vital to the future of 50 GHz coax.— *Microwave System News*, 1986, vol. 16, № 10, p. 90.

69. [www.agilent.com](http://www.agilent.com).
70. RF- Microwave Test Accessories. Каталог фирмы Hewlett-Packard (США), 1997/98.
71. Howell K., Wong K. DC to 110 GHz measurement in coax using the 1-mm connector. — *Microwave Journal*, 1999, № 7, p. 22.
72. Godshalk E.M., Pence J. Low-cost wafer probe scales 110 GHz summit. — *Microwaves and RF*, 1993, № 9, p. 162.
73. Джуринский К. В мире 2,9-мм соединителей. — *Электронные компоненты*, 2005, № 4, с. 101.
74. ГОСТ 20265-83. Соединители радиочастотные коаксиальные. Присоединительные размеры. — М.: Государственный комитет по стандартам, 1984.
75. ГОСТ 13317-89. Элементы соединения СВЧ-трактов радиоизмерительных приборов. Присоединительные размеры. — М.: Государственный комитет по стандартам, 1989.
76. Джуринский К.Б. Соединители зарубежных фирм в отечественных изделиях микроэлектроники СВЧ. — *Электроника НТБ*, 2003, № 2, с. 24.
77. Гулин А.И., Абубакиров Б.А., Львов А.Е., Горячев Ю.А. СВЧ-устройства на новом коаксиальном канале работают в миллиметровом диапазоне длин волн. — *Радиоизмерения и электроника. Журнал Нижегородского приборостроительного института «Кварц»*, 1993, № 1, с. 16.
78. Электронно-измерительные приборы. Каталог Нижегородского научно-исследовательского приборостроительного института «Кварц», 1993, с. 128.
79. Коаксиальные и волноводные устройства СВЧ и КВЧ. Каталог-94 научно-производственного предприятия «Ника-СВЧ» (г. Саратов), 1994.
80. НПП Спецкабель. Разработка, производство серийных кабелей и специальных конструкций. Каталог 2006.
81. СВЧ-устройства. Каталог 2006 года НПП «Микран».
82. Джуринский К.Б., Шатилов В.С. и др. Герметичные коаксиально-микрополосковые переходы с улучшенными параметрами для микроэлектроники СВЧ. — *Материалы 15-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*, 12–16 сентября 2005 г., Севастополь, Украина, с. 526.
83. Джуринский К.Б. Зарубежные и отечественные коаксиальные SMA- адаптеры для СВЧ-устройств. — *Электронные компоненты*, 2004, №1, с. 34.
84. Каталог фирмы Lucas Weinschel. A Division of Aerospace Communication and Electronics Inc, 1995.
85. Microwave products and instruments. Каталог фирмы Narda Microwave Corp., 1988.
86. Открытое акционерное общество завод «Марс». Каталог продукции, 2005 г.
87. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. Пер. с англ. под ред. Гальперина М.В. — М.: Мир, 1979. — 317 с.
88. 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.
89. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1984. — 336 с.



90. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. — М.: Радио и связь, 1987. — 256 с.
91. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. Изд. второе. — М.: Радио и связь, 1981. — 295 с.
92. Волин М.Л. Паразитные связи и наводки. — М.: Советское радио, 1965 — 232 с.
93. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования. Под ред. Варламова Р.Г. — М.: Советское радио, 1980. — 480 с.
94. Алексеев Л.В., Знаменский А.Б., Лоткова Е.Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. — М.: Связь, 1976. — 279 с.
95. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 1. Пер. с англ. под ред. А.И. Сапгира — М.: Советское радио, 1977. — 348 с.
96. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 2. Пер. с англ. под ред. А.И. Сапгира — М.: Советское радио, 1978. — 272 с.
97. Рикетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. Пер. с англ., под ред. Н.А. Ухина — М.: Атомиздат, 1979. — 327 с.
98. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Том 1. Пер. с англ. под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнيرا — М.: Связь, 1971. — 440 с.
99. Современная теория фильтров и их проектирование. Под ред. Г. Темеша и С.Митра. Пер. с англ., под ред. И.Н. Теплюка — М.: Мир. 1977. — 560 с.
100. Халяпин Д.Б. Коаксиальные и полосковые фильтры сверхвысоких частот — М.: Связь, 1979. — 64 с.
101. EMI Filtering Product Guide. Innovative EMC Solutions. Каталог фирмы «Spectrum Control Inc.» (США), 1997.
102. Джурицкий К.Б. Миниатюрные коаксиальные фильтры для цепей управления микроэлектронных устройств. — Электроника: НТБ, 2006, в печати.
103. Крюков М. Использование проходных керамических конденсаторов в фильтрах электромагнитной совместимости. — Компоненты и технология, 2002, № 8, с. 48.
104. Воловик М. Отечественные керамические проходные конденсаторы и фильтры для подавления электромагнитных помех. — Компоненты и технология, 2002, № 5, с. 14.
105. Куневич А.В., Сидоров И.Н. Индуктивные элементы на ферритах. Ферритовые сердечники в узлах радиоаппаратуры. — С.-Петербург, Лениздат, 1997. — 406 с.
106. Каталог фирмы Maxwell Technologies Energy Product (Sierra — KD components), 2000.
107. Filters EMI-RFI. Filtres Capacitifs et Condensateurs. Каталоги 0108-02 и 4000R2 фирмы Tusonix, 1996.
108. '88 MuRata Products. Каталог фирмы MuRata MFG Co. Ltd, 1988.
109. Low pass EMI Filters. Catalog № 59 — 14 MuRata Ene North America Inc.
110. EMI RFI Filters. Product Catalog фирмы Eurofarad. New Issue, 2003.
111. 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.

112. AMP Filters and Filtered Connectors. Каталог 82061 фирмы AMP Inc., 10/1994.
113. AMP. Summary Catalog 124761, 8/1994.
114. EMC Components. Short Form Catalog Siemens Matsushita Components, 1997.
115. Electronic Components. Проспект фирмы Oxley Developments Co, Ltd, 1988.
116. Конденсаторы: Справочник. Четвертков И.И., Дьяконов М.Н., Присняков В.И. и др. Под ред. И.И. Четверткова и М.Н. Дьяконова. — М.: Радио и связь, 1993. — 392 с.
117. Фильтры керамические Б7. Технические условия ОЖО.206.005ТУ, 1977.
118. Фильтры проходные Б14, Б23, Б23А, Б23Б. Технические условия ОЖО.206.021ТУ, 1974.
119. Фильтры Б24. Технические условия АДПК. 431145002 ТУ.
120. Джуринский К.Б. Миниатюрные помехоподавляющие фильтры для РЭА СВЧ.— Электроника: НТБ, 2001, № 3, с.24.
121. Самойлов В.Ф., Маковеев В.Г. Импульсная техника. — М.: Связь, 1971 — 224 с.
122. Иванов А.Б., Сосновкин Л.Н. Импульсные передатчики СВЧ.— М.: Советское радио, 1956.
123. Конструирование радиоэлектронных средств. Под ред. Б.Пестрякова. — М.: Радио и связь, 1992.
124. Воловик М., Смирнов В. Керамические проходные конденсаторы и фильтры питания нижних частот. Состояние и перспективы развития. — Электроника: НТБ, 2004, № 7, с. 36.
125. Джуринский К. Отечественные и зарубежные фильтры для микроэлектроники СВЧ. Какие лучше? — Электроника: НТБ, 2005, №1, с. 42.
126. ОАО «Кулон». Каталог, 2004 г.
127. РУНПП «Монолит». Каталог, 2003 г.
128. Oldfield B. Backside Connections. — Microwave Journal, 1997, №3, p.108.
129. Oldfield B. Connector and Termination Construction above 50 GHz. — Applied Microwave & Wireless. 2001, № 4, p. 56.
130. Nelson S., Youngblood M. and Pavia J. Optimum Microstrip Interconnects. — IEEE MTT-S Digest, 1991, p. 1071.
131. Rennard R.E., Mashouf H. Low VSWR Microcircuit Test Fixture. — Applied Microwave Spring, 1991, p. 87.
132. Chenkin J. DC to 40 GHz Coaxial-to-Microstrip Transitions for 100- $\mu$ m Thick GaAs Substrates. — IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1989, vol.37, №7, p 1147.
133. Morgan M. and Weinreb S A millimeter-wave perpendicular coax-to-microstrip transition. — IEEE MTT-S Digest, 2002, p. 817.
134. England E.H. A Coaxial to Microstrip Transactions. — IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1976, January, p. 47.
135. ОСТ 4ГО.010.224-82. Модули СВЧ интегральные. Конструирование. 1983
136. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов устройств СВЧ.— М.: Советское радио, 1976, 216 с.
137. Агапова В.Н., Груздев А.В и др. Исследование причин отказов твердотельных модулей СВЧ при воздействии термоциклов. — Электроника СВЧ, 1991, вып. 4(38), с. 52.

138. Джуринский К. Техника соединения коаксиально-микрополосковых переходов с микрополосковыми линиями в изделиях СВЧ. — Электронные компоненты, 2004, № 9, с. 39.
139. Ганстон М.А.Р. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ. Перевод с англ. Под ред. А.З.Фрадина. — М.: Связь, 1976 — 150 с.
140. Пат. РФ № 1808590, МКИ В 23К 35/24. Паста для низкотемпературной пайки/В.Ф. Шиханов, Н.П. Литвиненко. — Оpubл. в Бюл. № 14, 1993; Приоритет от 9.07.90.
141. Литвиненко Н., Шиханов В. Пастообразные припои для низкотемпературной пайки изделий микроэлектроники. — Производство электроники: Технологии, оборудование, материалы. — 2005, № 1, с. 73.
142. Григорьев В. Бессвинцовая технология — требование времени или прихоть законодателей от экологии. — Электронные компоненты, 2001, № 6, с. 72.
143. Подготовка к введению европейской директивы RoHS. Сборник материалов. Издательский дом «Электроника», 2006 — 46 с.
144. Шапиро Л. Внедрение европейской директивы RoHS. — Электронные компоненты, 2006, № 1, с. 9.
145. Шапиро Л. Новые европейские директивы для изделий электроники. — Производство электроники: Технологии, оборудование, материалы. 2006, №2, с. 11.
146. Ран А., Дием Р. Бессвинцовое производство — компоненты и покрытия. — Производство электроники: Технологии, оборудование, материалы.— 2006, № 2, с. 34.
147. Зубавичус В. Применение импортных ЭРИ в современной специальной аппаратуре. — Современная электроника, 2006, № 4, с. 18.
148. Эдвардс Т. Состояние и перспективы европейского рынка СВЧ-компонентов. — Новости СВЧ-техники, 1998, № 9, с. 1
149. Состояние и перспективы европейского рынка СВЧ-компонентов до 2000 г. — Новости СВЧ-техники, 1997, № 3, с. 113.

## ОБ АВТОРЕ



**Кива Борисович Джуринский,**  
кандидат технических наук, начальник  
лаборатории ФГУП «НПП «Исток».  
Автор более 100 научных публикаций и  
23 изобретений. Сфера научных инте-  
ресов — коаксиальные радиокомпонен-  
ты для микроэлектроники, технология  
РЭА СВЧ.

Заявки на книги присылайте по адресу:  
125319 Москва, а/я 594  
Издательство «Техносфера»  
e-mail: [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru)  
[sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)  
факс: (495) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте  
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте  
<http://www.technosphera.ru>

**Джуринский Кива Борисович**  
**Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты**  
**для микроэлектроники СВЧ**

*Соединители, коаксиально - микроиолосковые переходы,  
адантеры, СВЧ - вводы, низкочастотные вводы,  
изоляционные стойки, фильтры помех*

Компьютерная верстка — А.В. Бурага  
Корректор — Г.М. Мубаракшина  
Дизайн книжных серий — С.Ю. Биричев  
Дизайн — И.А. Куколева  
Выпускающий редактор — М.В. Капранова  
Ответственный за выпуск — О.А. Казанцева

---

Формат 60х90/16. Печать офсетная.  
Гарнитура Ньютон  
Печ.л. 13,5. Тираж 3000 экз. Зак. № 1316.  
Бумага офсет №1, плотность 65г/м<sup>2</sup>

---

Издательство «Техносфера»  
Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

---

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ООО «Чебоксарская типография №1»,  
428019 г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15





**Компания ООО "Амитрон электроникс"** производит радиочастотные коаксиальные соединители согласно ГОСТ 20265-83, ГОСТ 20465-85, ГОСТ 13317-89 и стандартов MIL-C-39012, IEC, NFC 93650, DIN и т.д.

Компания производит 30 серий различных соединителей с присоединительными размерами 7/3,04 мм, 3,5/1,52 мм, 6/2,6 мм и каналами типа N, 7/16, TNC и т.д., а также герметичные и не герметичные микрополосковые переходы с присоединительными размерами 3,5/1,52 мм и 7/3,04 мм по ГОСТ 20265-83.

ООО "Амитрон электроникс" принимает заказы на производство радиочастотных коаксиальных соединителей по чертежам заказчика, а также на разработку и производство соединителей согласно техническому заданию.



**ООО Амитрон электроникс**  
123592 Россия, г. Москва ул. Кулакова 20 стр. 1А  
+7495 757-96-94, +7495 757-65-09, +7495 750-64-11  
E-mail: [sales@amel.ru](mailto:sales@amel.ru) Web: [www.amel.ru](http://www.amel.ru)

## Соединители для СВЧ устройств

Компания AMP является одним из лидеров рынка коаксиальных радиочастотных соединителей. Такие разъемы применяются для соединения между собой кабелей или устройств с кабелем в электрических цепях с радиочастотным трактом в диапазоне ГГц. Компания выпускает разъемы на диапазоны **X, Ku, K, U, V, W до 60 ГГц.**

<b>BNC разъемы</b>	Стандартные соединители с рабочей частотой до 4 ГГц Байонетное соединение, 50 и 75 Ом Самый широкий модельный ряд среди производителей: для кабеля, на плату, адаптеры, ответные части Различные методы монтажа: в отверстие, запрессовка, для поверхностного монтажа
<b>Серия SMA</b>	Надежные разъемы с резьбовым соединением до 12.4-18 ГГц Соответствуют требованиям стандарта MIL-C 39012 Не требуют специального обжимного инструментария Модели со специальным немагнитным покрытием, для уменьшения перекрестных наводок
<b>Серия SMB</b>	Миниатюрный аналог SMA серии с полосой до 4 ГГц Версии 50 и 75 Ом Быстрота и легкость монтажа при соединении защелкиванием Для устройств с высокой плотностью монтажа Для многократного соединения и разъединения
<b>Серия SMC</b>	Высокая эффективность в диапазоне до 10 ГГц, 50 Ом Комплект соединителя из трех деталей Резьбовое соединение с гайкой Для работы в условиях высокой вибрации
<b>Серия TNC</b>	Низкий уровень шумов и стабильность в диапазоне до 11 ГГц Модели 50 и 75 Ом Для работы в тяжелых условиях Миниатюрные резьбовые соединители соответствуют военному стандарту MIL-C-39012 Широкий модельный ряд: вилки и розетки для монтажа на кабель, адаптеры и разъемы для печатных плат Модели в стандартном и защитном исполнении
<b>Серия UHF</b>	Высокая стабильность рабочих характеристик в диапазоне до 2 ГГц Для коммуникаций и промышленного применения Для кабелей RG/U58, 58A, 58B, 58C, 59, 59A, 59B, 188 Портативные габаритные размеры

Офисы в Москве: м. Молодежная: Москва, ул.Ивана Франко, 40, стр.2, (495)97-000-99, почта: 121351, Москва, а/я 100, e-mail: platan@aha.ru м. Новослободская: Москва, 1-й Шеминский пер., 17/19, стр.2 (495)744-70-70, platan@platan.ru

Офис в Санкт-Петербурге: ул.Зверинская, 44 (812) 322-88-38, 232-23-73, baltika@platan.spb.ru  
Представительства: Воронеж: (0732) 59-75-57 Казань: (8432) 92-18-06 Киев: (38044) 494-37-92 Новосибирск: (3832) 16-33-66 Омск: (3812) 24-69-03 Ульяновск: (8422) 37-65-67 Уфа: (3472) 32-10-79  
Региональные дилеры: Белгород: (0722) 32-87-22 Киевск: (3412) 43-72-51 Омск: (3812) 24-10-90 Ростов-на-Дону: (8632) 44-34-48 Саратов: (8452) 27-88-56 Симферополь: (8492) 39-28-09 С.-Петербург: (812) 327-96-92 Саратов: (8452) 27-88-56 Тольятти: (8482) 78-33-83 Тюмень: (3472) 55-65-30, 51-32-25 Чебоксары: (8362) 36-63-03 Йошкар-Ола: (8362) 46-17-45 Ижевск: (375-17) 287-28-60 Якутск: (4112) 35-07-19



## ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО MOLEX

ул. Смольная 24/Д,  
125445 Москва, Россия  
Телефон: +7 (495) 258 8444  
Факс: +7 (495) 258 5996  
[www.molex.com](http://www.molex.com)  
[www.molex.ru](http://www.molex.ru)  
Email: [dmitry.tcholovsky@molex.com](mailto:dmitry.tcholovsky@molex.com)



## МЫ ПРОИЗВОДИМ



**РАДИОЧАСТОТНЫЕ  
РАЗЪЕМЫ  
И КАБЕЛЬНЫЕ  
СБОРКИ**

**ОТ  
САМЫХ  
БОЛЬШИХ**



**ДО САМЫХ  
МАЛЕНЬКИХ**

## А МЫ ПРОДАЁМ

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР В РОССИИ**

111141 Россия, Москва,  
Зеленый проспект, д.2/19, стр.3

Тел: +7 495 306 0026,  
+7 495 306 4721,  
+7 495 306 4789

Факс: +7 495 306 0283

<http://www.macroteam.ru>

E-mail: [molex@macroteam.ru](mailto:molex@macroteam.ru)







НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА

**МИКРАН**

634034, г. Томск, ул. Вершинина, д. 47

Тел. +7 (3822) 41-46-32, 41-46-35, 41-34-03

Факс +7 (3822) 42-36-15, e-mail: pribor@mikan.ru



- Рабочий диапазон частот: **P2M-04** от 10 МГц до 4 ГГц, **P2M-18** от 10 МГц до 20 ГГц
- Диапазон измерения: КСВН от 1,05 до 5,00; ослабления от 0 до -60 дБ
- Динамический диапазон прибора не менее 60 дБ (-50 дБм... +16 дБм)
- Соответствует первому классу точности по ГОСТ
- Встроенный малошумящий синтезатор
- Многофункциональное программное обеспечение
- Интерфейс с компьютером Ethernet 10/100

Измеритель  
модуля коэффициента  
передачи и отражения



МИКРОВОЛНОВЫЕ  
СИСТЕМЫ

**ЗАО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»**

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СВЧ

**ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.**

Почтовый адрес:  
107078, Москва, а/я 272  
Тел. (495) 263-96-29,  
тел./факс (495) 267-75-07  
mwsystems@mail.ru



- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, СЕРИЙНОМУ И КОНТРАКТНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ ШИРОКОПОЛОСНЫХ МОЩНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ (1-18 ГГц) И ДРУГИХ СВЧ УСТРОЙСТВ
- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО

[www.mwsystems.ru](http://www.mwsystems.ru)

# НОВЫЕ КНИГИ

ПО ТЕХНИЧЕСКИМ И ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ И СПЕЦИАЛИСТОВ

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ТЕХНОСФЕРА»

WWW.TECHNOSPHERA.RU



**ТЕХНОСФЕРА**  
ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

125319, г. Москва, а/я 594

Тел.: (495) 234-0110 Факс (495) 956-3346

E-mail: knigi@technosphaera.ru

<http://www.technosphaera.ru>





# Спецкабель

СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ  
РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

РАДИОЧАСТОТНЫЕ  
КОАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

ПЕРЕХОДЫ КОАКСИАЛЬНЫЕ

ПЕРЕХОДЫ КОАКСИАЛЬНЫЕ ГЕРМЕТИЧНЫЕ

КАБЕЛЬНЫЕ СБОРКИ

Гибкие,  
полугибкие,  
жесткие

По техническому  
заданию  
заказчика

---

Научно-производственное предприятие "Спецкабель"

107014, г.Москва, ул. Стромынка, д.18  
Тел: (495) 101-40-99 (многоканальный), 268-3406,  
603-09-20, 268-0855

e-mail: [info@specable.ru](mailto:info@specable.ru)  
<http://www.specable.ru>

нам 10 лет

# ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА ТЕХНОЛОГИЯ БИЗНЕС

Журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес" издается с 1996 года.

Издатель РИЦ "ТЕХНОСФЕРА".

Периодичность с 2003 года – 8 номеров в год. Тираж 17 тыс. экземпляров.

Среди многочисленных изданий по электронике журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ" занимает особое место. Это единственный в России журнал, свыше двадцати рубрик которого посвящены проблемам всей электроники в целом – от электронных компонентов до вычислительной техники и радиоэлектронных систем различного назначения, а также вопросы экономики и бизнеса.

Журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ" выступает информационным спонсором и активно участвует в отечественных и международных выставках и форумах по связи, информатике и другим направлениям электроники.

## подписка

- по каталогу "Газеты и журналы" агентства "Роспечать", индексы:  
71775 – полугодовой индекс  
47299 – годовой индекс
- в объединенном каталоге "Пресса России" 26037 – полугодовой индекс
- в ООО "Вся пресса" по тел.: (495) 257-9980
- в редакции журнала по тел.: (495) 234-0110



# ПЕЧАТНЫЙ МОНТАЖ

Новое издание издательского дома "Техносфера" – журнал "ПЕЧАТНЫЙ МОНТАЖ".  
Расчитан на специалистов в сфере высоких технологий и электроники.

Распространяется по подписке  
(с журналом ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ) по всей России, странам СНГ, на выставках, семинарах и презентациях.

На 2006 год можно оформить бесплатную подписку.

Тираж 4 000 экз.

Аудитория: от 20 до 50 лет, руководители, специалисты, научные работники, преподаватели технических ВУЗов и др.



Для писем: 125319, Москва, а/я 594, ЗАО "РИЦ "ТЕХНОСФЕРА"

Тел.: (495) 234-0110 Факс: (495) 956-3346

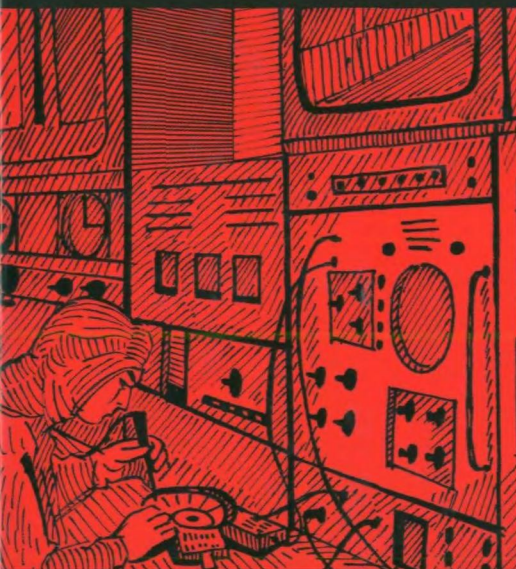
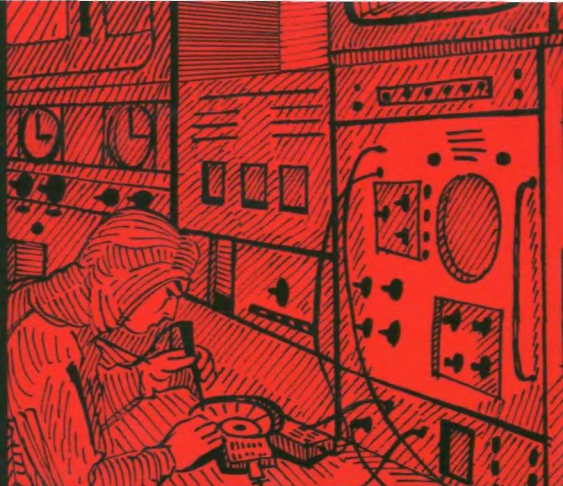
E-mail: journal@electronics.ru Http://www.electronics.ru



# мир электроники

К. ДЖУРИНСКИЙ

## Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ



К.Б. ДЖУРИНСКИЙ – К.Т.Н.,  
НАЧАЛЬНИК ЛАБОРАТОРИИ  
ФГУП "НПП "ИСТОК".  
АВТОР БОЛЕЕ  
100 НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ  
И 23 ИЗОБРЕТЕНИЙ

СОЕДИНИТЕЛИ,  
КОАКСИАЛЬНО –  
МИКРОПОЛОСКОВЫЕ  
ПЕРЕХОДЫ,  
АДАПТЕРЫ, СВЧ – ВВОДЫ,  
НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВВОДЫ,  
ИЗОЛЯЦИОННЫЕ СТОЙКИ,  
ФИЛЬТРЫ ПОМЕХ



ТЕХНОСФЕРА

ISBN 5-94836-095-4



9 785948 360959

