

УДК 621.372.8

**О СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНЫХ
РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СОЕДИНЕНИЯ СВЧ ТРАКТОВ
ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

В.А. Семёнов, А.С. Бондаренко, И.М. Малай

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
smnv@vniiftri.ru*

Рассмотрены текущее состояние и некоторые проблемы при стандартизации присоединительных размеров СВЧ соединителей различных типов. Даны предложения по внесению изменений в соответствующие отечественные стандарты с целью актуализации этих стандартов.

Ключевые слова: СВЧ соединители, присоединительные размеры, стандарты.

**ABOUT STANDARDIZATION OF CONNECTION SIZES
OF CONNECTION ELEMENTS OF ASSEMBLY
OF MICROWAVE DEVICES OF ELECTRONIC
MEASURING INSTRUMENTS**

V.A. Semenov, A.S. Bondarenko, I.M. Malay

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
smnv@vniiftri.ru*

The current state and some problems in standardizing the connecting sizes of microwave connectors of various types are considered. Proposals for amending the relevant domestic standards in order to update these standards are given.

Key words: microwave connectors, connection sizes, standards.

Волноводные и коаксиальные линии передачи нашли широкое применение в радиотехнических устройствах различного назначения. Основными их достоинствами являются простота конструкции, малые погонные потери и возможность передачи больших уровней мощности. Для соединений различных элементов СВЧ тракта используются соединители различных конструкций. Соединители должны обеспечивать надёжный электрический контакт между соединяемыми устройствами. Они не должны снижать электрическую прочность тракта и вносить значительные отражения в тракт. Кроме того, соединители должны обеспечивать необходимый уровень радиогерметичности тракта, т.е. минимальный уровень излучения электромагнитных волн из места соединения линий передачи. Для измерений характеристик различного рода радиотехнических устройств в СВЧ трактах применяется соответствующая радиоизмерительная аппаратура.

В Российской Федерации в составе электронных измерительных приборов рекомендованы для использования соединители с присоединительными размерами по ГОСТ 13317-89 и ГОСТ РВ 51914-2002. С момента выпуска указанных документов они не актуализировались. В то же время за рубежом были разработаны и приобрели популярность новые типы соединителей, не вошедшие в указанные стандарты. Общий спад производства отечественной измерительной техники привёл к тому, что доля импорта на российском рынке СВЧ измерительных приборов стала подавляющей. В результате переоснащения отечественных предприятий средствами измерений импортного производства огромное количество средств измерений радиотехнического направления в стране имеют соединители, соответствующие не российским, а международным стандартам. На момент своего принятия ГОСТ РВ 51914-2002 устранил самые острые проблемы стандартизации в этой области. В этот стандарт были включены наиболее распространённые коаксиальные и волноводные соединители, соответствующие стандартам МЭК. Однако с тех пор прошло уже более 15 лет, и сегодня назрела необходимость актуализации указанных документов. Особенностью ГОСТ РВ 51914-2002 является то, что доступ к нему ограничен, это делает его неудобным для использования в народнохозяйственных разработках. Диапазон частот современных коаксиальных соединителей достиг 110 ГГц, а волноводных — единиц терагерц. Номенклатура соединителей различной конструкции, применяемых в составе средств измерений, также увеличилась.

Таким образом, актуализация государственных стандартов в отношении элементов соединения СВЧ трактов, и особенно её народно-хозяйственной части — ГОСТ 13317, является важной задачей.

Решение задачи актуализации отечественных стандартов целесообразно проводить следующими путями:

- дополнением их наиболее распространёнными (востребованными) вариантами соединителей из международных стандартов (данный вариант позволяет быстро привести отечественные стандарты в соответствие современным требованиям и обеспечивает возможность для отечественных предприятий конкурировать на международном рынке без доработки своей продукции);
- доработкой востребованных у пользователей отечественных вариантов исполнения соединителей с целью повышения их качества до необходимого уровня.

Рассмотрим поочерёдно вопросы стандартизации коаксиальных и волноводных соединителей.

Общемировой тенденцией является одновременное движение в сторону расширения вверх частотного диапазона всех типов используемых линий передач и постепенный переход на коаксиальные или полосковые линии передачи в тех диапазонах частот и мощностей, где они могут заменить волноводные линии и, соответственно, волноводные соединители.

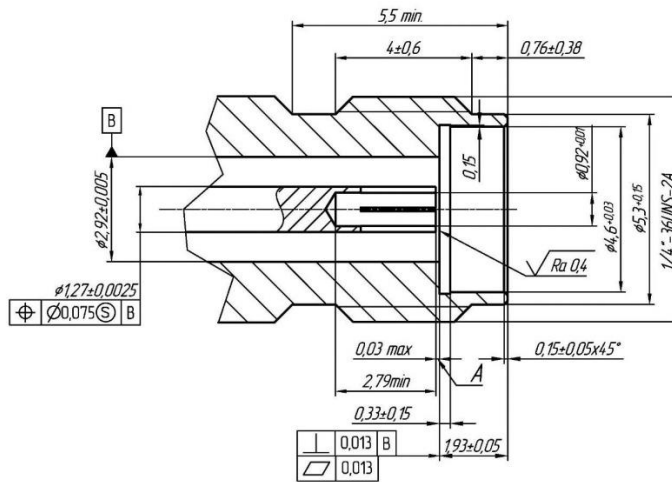
За рубежом процесс разработки стандартов для работы в миллиметровом диапазоне длин волн не прекращался. Так, в 2007 г. был выпущен международный стандарт IEEE Std 287-2007 на прецизионные коаксиальные соединители, описывающий 8 коаксиальных трактов для работы в диапазоне частот от постоянного тока до 110 ГГц и предусматривающий двойную градацию по точности изготовления соединителей. GPC (*general precision connectors*) — прецизионные соединители общего применения и LPC (*laboratory precision connectors*) — прецизионные соединители специального применения. Некоторые характеристики соединителей по IEEE Std 287-2007 и их соответствие отечественным стандартам указаны в таблице 1.

Таблица 1

Сечение тракта <i>D/d</i> , мм	7/3,04	Частично совместимы			Частично совместимы		1,00/0,43
		3,5/1,52	3,5/1,52	2,92/1,27	2,4/1,042	1,85/0,8	
Тип зарубежного соединителя IEEE Std 287 TM-2007	N	SMA	3,5 мм	2,92 мм (k-type)	2,4 мм	1,85 мм	1,00 мм
Тип отечественного соединителя по ГОСТ 13317-89	Тип III	Тип IX, вариант 1	Тип IX, вариант 3	Отсутствует	Тип I	Отсутствует	Отсутствует
Частота применения, ГГц	до 18	до 18	до 33	до 40	до 50	до 65	до 110
Ресурс соединителя	5000	1000	3000	2000	5000	5000	3000

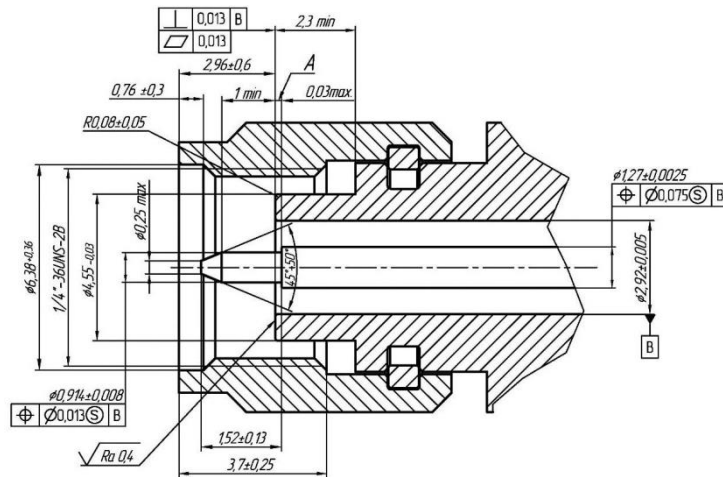
Практически все соединители, содержащиеся в этом стандарте, уже получили массовое распространение в РФ и в мире. Поэтому в качестве источника для наполнения отечественного ГОСТ 13317 решениями для коаксиальных радиочастотных соединителей логично использовать именно актуальную версию IEEE Std 287-2007. Как видно из таблицы 1, в ГОСТ 13317 по сравнению с Std 287 отсутствуют сразу три типа коаксиальных соединителей — 2,92, 1,85 и 1,00 мм. Другие, из указанных в таблице отечественных соединителей, для совместимости с Std 287 требуют различного рода доработок. Это в первую очередь касается допусков на размеры и типов используемых резьб. Доработку ГОСТ 13317 в части коаксиальных соединителей предлагается проводить в виде внесения в него новых вариантов исполнения — «прецизионный соединитель...». При этом прежние варианты исполнения исключать не нужно, а варианты, которые не совместимы с новыми соединителями, предлагается пометать фразой «в новых разработках не при-

менять». На рис. 1 и 2 приведён пример возможного исполнения пары соединителей 2,92/1,27 мм (тип — К).



Примечания - В неизмерительных соединениях размер *A* устанавливается до 0,1 max мм.

Рис. 1. Тип К. Розетка



Примечания - В неизмерительных соединениях размер *A* устанавливается до 0,1 max мм.

Рис. 2. Тип К. Вилка

Подобные чертежи для соединителей 1,85 и 1,00 мм могут быть подготовлены в сжатые сроки на основе исполнений стандарта IEEE Std 287-2007.

Качество соединения коаксиальных трактов в первую очередь зависит от качества соединения стыкуемых элементов центрального проводника. Для каждого коаксиального соединителя возможный зазор в центральном проводнике (расстояние между действительным и идеальным положениями плоскости контакта центрального проводника) определяется параметром «реcessия». Этот параметр регламентируется отечественными стандартами (допуск на размер A), которые устанавливают довольно свободный допуск на recessию на все соединители. Например, для соединителей типа III (розетка) допуск на присоединительный размер A составляет 160 мкм (максимальная глубина). Между тем по сложившейся сегодня зарубежной классификации коаксиальных соединителей, данная recessия отвечает лишь соединителям общего применения. Для прецизионного соединителя типа N (розетка) зарубежный стандарт IEEE Std 287-2007 задаёт максимально допустимую recessию 76 мкм, т.е. в два раза меньше. Величина recessии напрямую влияет на СВЧ параметры коаксиального соединителя. Чем выше величина recessии, тем больше длина неоднородности L (см. рис. 3), возникающей на стыке соединителей, и как следствие больший КСВН устройства. Проведённые специалистами «Микран» исследования показали, что увеличение recessии на 20 мкм способно ухудшить возвратные потери перехода с -35 до -30 дБ в некоторых диапазонах рабочей полосы частот, в единицах КСВН означает ухудшение с 1,03 до 1,06. Таким образом, для создания прецизионных соединителей необходимо уменьшать recessию всеми имеющимися способами.

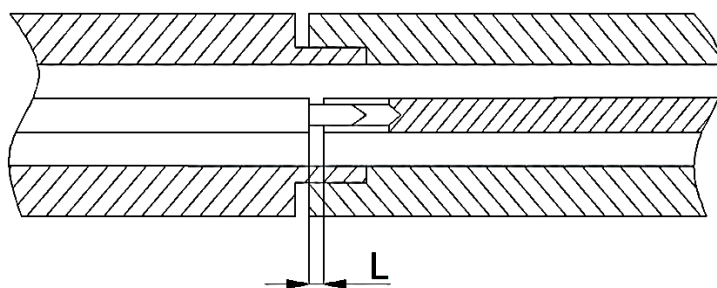


Рис. 3. Неоднородность, вызываемая recessией

В отечественных стандартах на соединители типов III и N установлены номинальные значения присоединительного размера A (recessии центрального проводника) для вилки 5,28 мм и для розетки 5,26 мм. Таким образом, даже при нулевом допуске на recessию на стыке образуется неоднородность L длиной 20 мкм. Допуск на recessию лишь усугубляет положение, увеличивая зону неоднородности и ухудшая КСВН. Для достижения более высоких точностей измерений необходимо установить номинальное значение данного присоединительного размера для вилки тип III и тип N как 5,26 мм

(так же, как у розеток данных типов). Разнонаправленные допуски на присоединительные размеры вилки и розетки гарантируют невозможность ситуации протрузии (когда при сочленении соединителей контакт по центральному проводнику происходит раньше, нежели по внешнему, что приводит к поломке пары соединителей).

Итогом редакции ГОСТ 13317, в части коаксиальных соединителей, являются:

- включение в стандарт наиболее широко распространённых коаксиальных соединителей (в том числе и зарубежных), используемых при создании измерительных приборов;
- изменение требований к размерам рецессии (от нуля) центрального проводника коаксиального соединителя обеспечивает достижение наилучших метрологических характеристик (согласование, повторяемость) создаваемых средств измерений;
- гармонизация ГОСТ 13317 с международным стандартом IEEE Std 287-2007 обеспечит соответствие стандарта современным международным требованиям.

Диапазон частот современных волноводных измерительных приборов значительно расширился и достигает значений единиц терагерц. ФГУП «ВНИИФТРИ» имеет комплект оборудования для измерений комплексных коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот до 330 ГГц. Пропорционально уменьшению длины волны уменьшаются и геометрические размеры передающих трактов. Соответственно повышаются и требования к точности изготовления как самих трактов передачи, так и соединителей (волноводных фланцев), которыми они оснащены. Например, на частоте 178,4 ГГц погрешность $\pm 3,5$ мкм определения расстояния между входной плоскостью и плоскостью короткого замыкания волноводной меры приводит к погрешности определения фазы коэффициента отражения $\pm 1,3$ градуса. Также повышаются требования к точности сопряжения волноводных узлов друг с другом. Современные технологии металлообработки позволяют обеспечить эти требования. Оснащение производства многофункциональными обрабатывающими центрами с точностью обработки деталей 5 мкм и менее в настоящее время является нормой.

Доработка ГОСТ 13317 в части волноводных соединителей заимствованием востребованных у отечественного потребителя вариантами исполнения соединительных волноводных фланцев из международных стандартов недостаточна. Кроме этого, необходимо провести доработку имеющихся в ГОСТ 13317 соединителей миллиметрового диапазона длин волн с целью улучшения параметров их согласования и снижения случайной составляющей погрешности при перестыковках.

Разработка международного стандарта по волноводным соединителям выполнялась в несколько этапов. В 2012 г. была принята первая часть (1785.1) международного стандарта IEEE 1785, описывающая частотные по-

лосы и геометрические размеры волноводных линий передачи. В 2016 г. была принята вторая часть (1785.2), описывающая конструкции волноводных фланцев (включая инженерные чертежи). Таким образом, этот стандарт обеспечил наиболее важные спецификации для полых металлических прямоугольных волноводов, работающих на частотах от 110 ГГц и выше. В том же 2016 г. аналогичная (по сути, повторяющая 1785) серия стандартов (IEC 60154) была принята уже под эгидой Международной электротехнической комиссии. Наиболее интересным из предложенных вариантов исполнений фланцев можно выделить фланец 1785.2a (тип F в 60154) (см. рис. 4). В нём реализовано сразу несколько удачных технических решений:

- благодаря большой площади фланца (внешний диаметр — 19,05 мм) хорошо обеспечивается выравнивание соединяемых поверхностей фланцев;
- совместно с четвёркой штатных штифтов (по 2 запрессованных со стороны каждого стыкуемого фланца) предусмотрены дополнительные штифтовые отверстия для точного позиционирования стыкуемых фланцев;
- антиперекосное исполнение;
- геометрические размеры заданы с высокой точностью;
- возможность установки центрирующего кольца между фланцами (1785.2b).

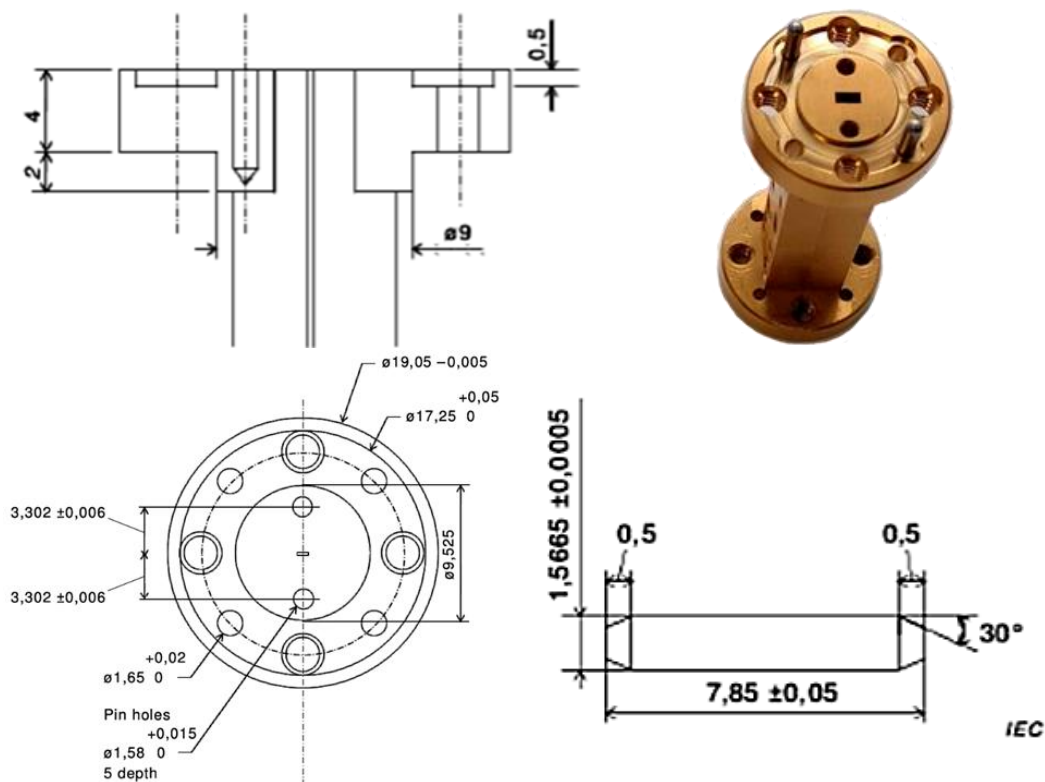


Рис. 4. Фланец типа F по IEC 60154 (UG-387/U)

При этом данные фланцы не лишены недостатков. Например, не очень удачно выбрано положение дополнительных штифтовых отверстий. Они попадают непосредственно в плоскость соприкосновения двух половинок волноводов в случае, если волновод изготавливается наиболее массовым способом — способом фрезерования. Обработка фланца детали происходит «в сборе», и ситуация, при которой половинки немного разойдутся из-за воздействия резца и стружки, весьма вероятна.

Проблема несоответствия изготовленных по отечественным стандартам волноводных соединителей современным метрологическим требованиям проявилась во ФГУП «ВНИИФТРИ» при проведении работ по созданию эталона комплексного коэффициента отражения волноводных трактов в диапазоне частот до 178,4 ГГц. Волноводные фланцы разрабатываемого эталона должны соответствовать отечественному стандарту, при этом метрологические характеристики эталона должны соответствовать лучшим мировым образцам подобной техники. Если в волноводных трактах 5,2×2,6 и 3,6×1,8 мм характеристики отечественных соединителей ещё сравнимы с аналогичными параметрами фланцев, выполненных по международным стандартам, то в трактах 2,4×1,2 и 1,6×0,8 мм ситуация резко ухудшилась. Дело в том, что используемые в РФ волноводные соединители (см. рис. 5) для диапазонов частот свыше 78,33 ГГц (тракт 2,4×1,2 мм и меньше) хотя и довольно практичны при создании рядовой аппаратуры из-за своей миниатюрности и простоты коммутации, но в метрологических применениях они являются «слабым звеном», в первую очередь из-за проблем с повторяемостью при перестыковках.

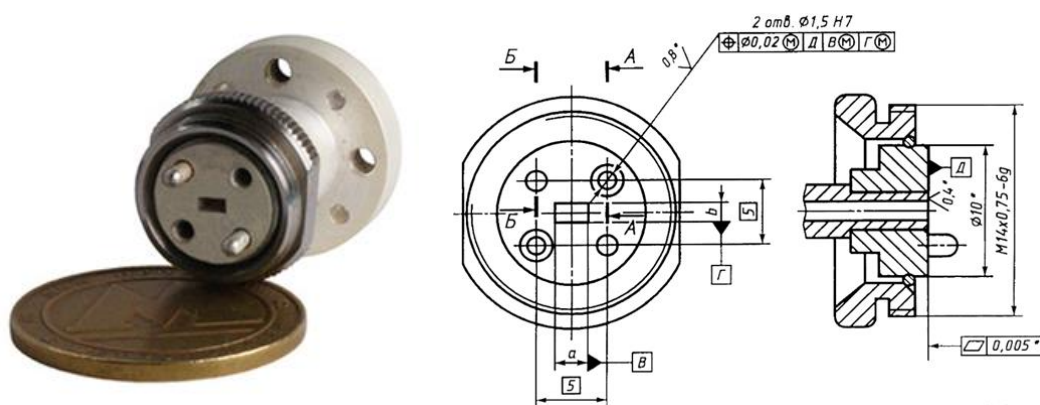


Рис. 5. Прецизионные фланцы для волноводов сечений 0,7×0,35 мм; 1,1×0,5 мм; 1,6×0,8 мм; 2,4×1,2 мм

При анализе и обсуждении возможных причин наблюдаемых нестабильностей были выделены следующие причины:

- фланец миниатюрный, диаметр цилиндрических поверхностей стыкуемых деталей всего 10 мм, из-за этого возникает высокая вероятность перекосов при малейшем возникновении в соединительной плоскости изгибающего момента между стыкуемыми волноводами, и как следствие — реализация некачественного соединения;
- распорная шайба в сечении круглая, при стыковке она передаёт как продольные усилия (направленные вдоль оси волновода), так и поперечные усилия (направленные к осевой линии волновода в плоскости ей перпендикулярной). Это приводит к тому, что становится трудно создать нормированное усилие стягивания стыкуемых фланцев из-за появления эффекта «закусывания» на скользящих кромках распорной шайбы и в резьбовом соединении. Этот эффект сильно зависит от применяемых материалов и качества обработки скользящих поверхностей, особенно торцевой кромки распорной шайбы. В конечном счёте этот эффект становится индивидуальным свойством каждого конкретного соединителя;
- при затягивании гаек из-за высокого трения между гайкой и фланцем возникает гарантированный поворот окон соединяемых волноводов друг относительно друга по оси волновода (см. рис. 6);
- переходная гайка непрозрачна и не позволяет визуально оценивать качество соединения сопрягаемых деталей на просвет.

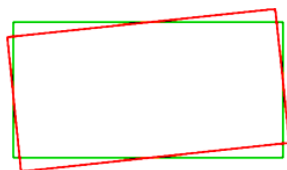
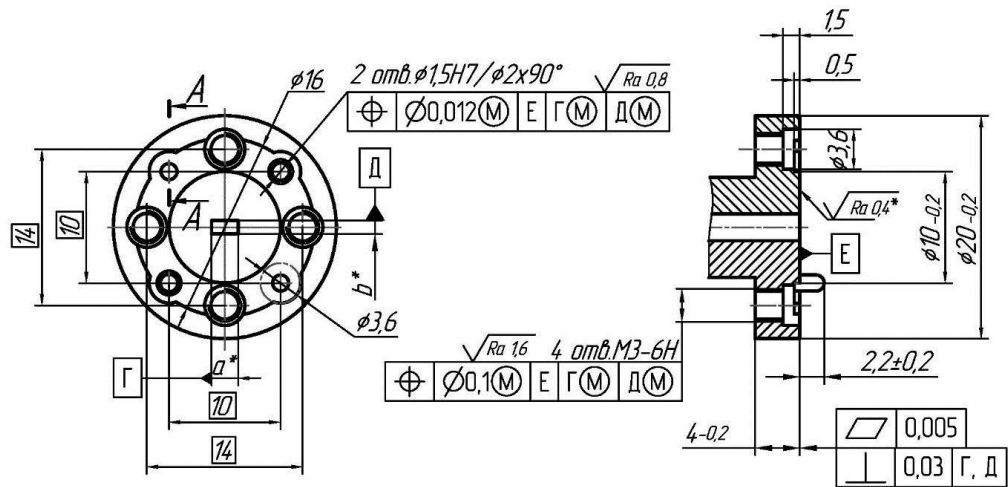


Рис. 6.

Предлагаемый вариант реализации

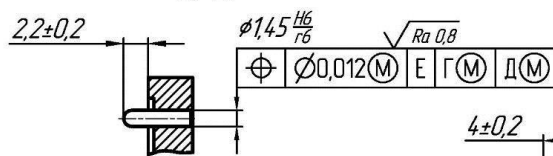
Для снижения влияния перечисленных выше причин на результат измерений ККО и ККП специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» были выработаны следующие предложения по изменению соединительных волноводных фланцев.

1. За основу при создании новых прецизионных волноводных соединителей, работающих на частотах выше 37,5 ГГц, использовать действующий прецизионный фланец для сечений 5,2×2,6 и 3,6×1,8 мм.
2. Для прецизионных волноводных соединителей, работающих в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц, уменьшить площадь соприкосновения стыкуемых фланцев путём фрезерования кольцевого паза (см. рис. 7), что позволит увеличить давление между соприкасающимися поверхностями, а фрагмент поверхности, располагающийся у внешней кромки фланца, исключит возникновение перекосов при стыковке.



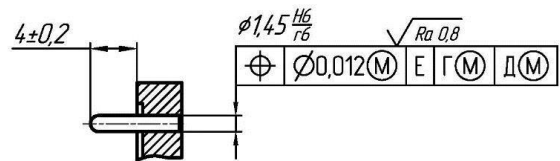
Вариант 1

A-A



Вариант 2

A-A



Сечение волновода, мм			
a		b	
номинал	пред. откл.	номинал	пред. откл.
3,6	±0,005	1,8	±0,005
5,2		2,6	

*Размеры, допуски плоскостности и шероховатости поверхностей приведены для справок.

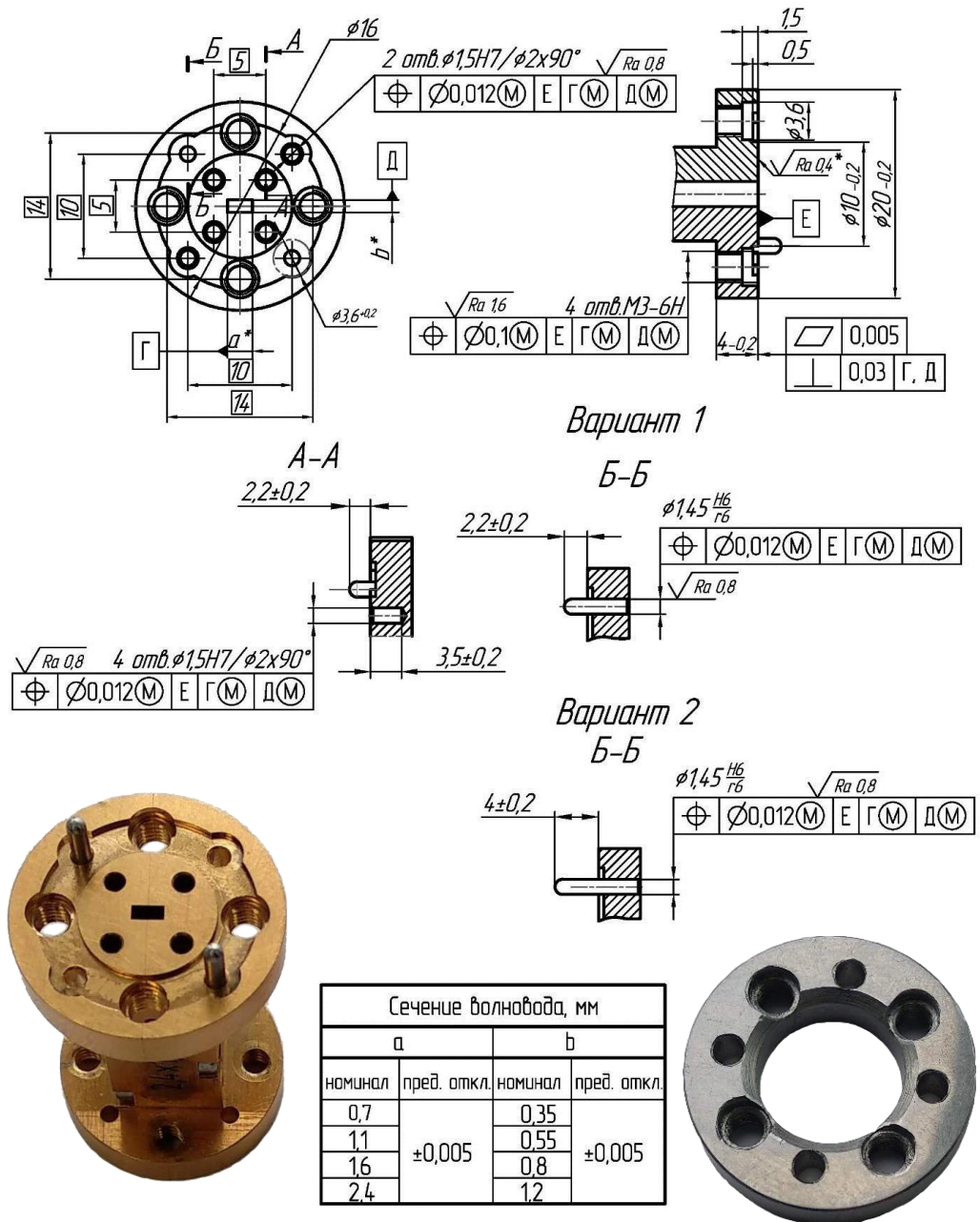
Примечание - Числовые значения размеров a и b должны соответствовать таблице 3 ГОСТ РВ 51914-2002.

Рис. 7. Проект прецизионного фланца для 3,6×1,8 мм; 5,2×2,6 мм

3. Для прецизионных волноводных соединителей, работающих в диапазоне частот свыше 78,33 ГГц, дополнительно к изменениям п. 2 добавить четыре штифтовых отверстия (см. рис. 8). Их диаметры и расположение соответствуют рис. 5. Это позволит, с одной стороны, обеспечить совместимость со старым вариантом фланца, а с другой стороны, — позволит при проведении наиболее ответственных измерений точнее позиционировать волноводы, устанавливая в эти отверстия дополнительные штифты. Степень свободы перемещения сопрягаемых волноводов при этом будет снижена. Для ещё более точного позиционирования каналов волноводов есть возможность применять вместо штифтов $\varnothing 1,45r6$ штифты $\varnothing 1,5h7$. В качестве таких штифтов отлично подходят игольчатые ролики для подшипников. Из-за массовости производства они чрезвычайно дешёвы и одновременно имеют высокое качество. Совместимость с фланцами, изображёнными на рис. 5, обеспечивается временной заменой штатной накидной гайки на специально разработанный стягивающий фланец (см. рис. 8, изображение справа).
4. Предусмотреть для прецизионных фланцев возможность установки в них удлинённых штифтов (вариант 2), так как широко применяемые в настоящий момент векторные анализаторы цепей (ВАЦ) для своей калибровки используют отрезок волноводной линии, включённый между двумя калибруемыми портами (фланцами) ВАЦ.
5. Дополнить стандарт прецизионными волноводными соединителями UG-381/U, UG-383/U, UG-383/U mod, изготавливаемыми в антиперекосном исполнении в соответствии с рис. 9.
6. Дополнить стандарт прецизионными волноводными соединителями UG-385/U, UG-387/U и UG-387/U mod. Дополнительно к изменениям п. 4 оснастить парой штифтовых отверстий для точного позиционирования каналов волноводов.

Доработку ГОСТ 13317 в части волноводных соединителей предлагается проводить в виде внесения в него новых вариантов исполнения — «прецизионный соединитель...». При этом прежние варианты исполнения не отменять, а варианты, которые не исключают возможности перекоса, в новых разработках не применять.

Для справки. Работы по внесению изменений в государственные стандарты в Российской Федерации осуществляются в соответствии с планом стандартизации и финансируются, в том числе после появления официальных обращений заинтересованных организаций в адрес Росстандарта или его технического комитета, ответственного за направление. В случае радиочастотных соединителей — это ТК 46 «Кабели, провода, волноводы, радиочастотные соединители, радиочастотные и микроволновые пассивные элементы и арматура».



*Размеры, допуски плоскостности и шероховатости поверхностей приведены для справок.
 Примечание - Числовые значения размеров a и b должны соответствовать таблице 3
 ГОСТ РВ 51914-2002.

Рис. 8. Проект прецизионного фланца для сечений волноводов 0,7×0,35 мм; 1,1×0,5 мм; 1,6×0,8 мм; 2,4×1,2 мм

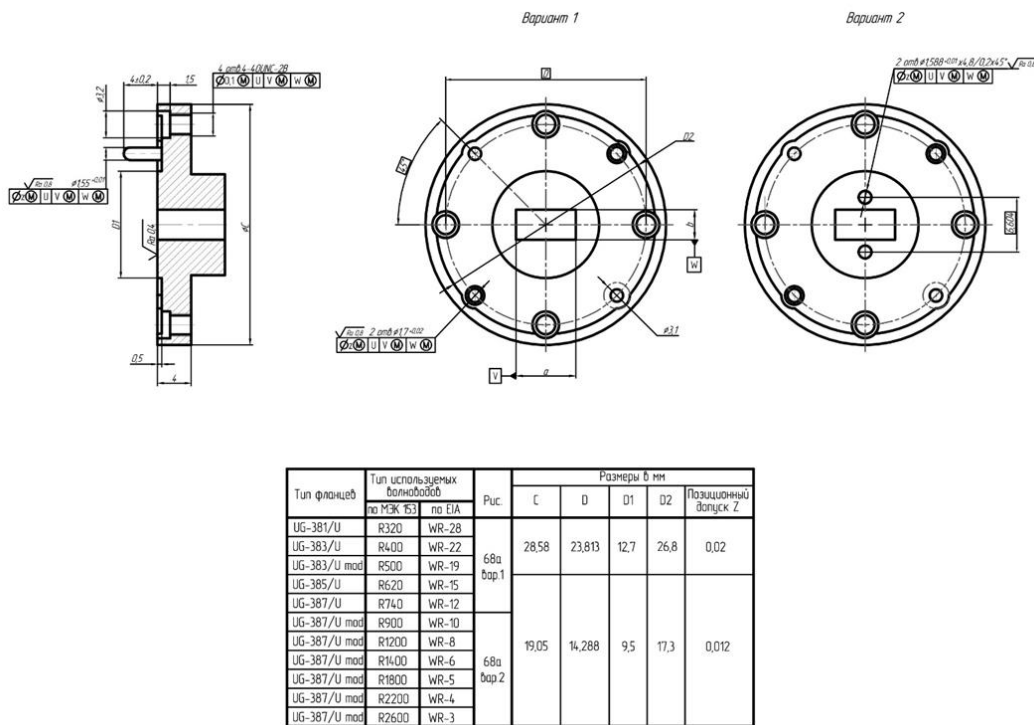


Рис. 9. Проект прецизионного фланца UG-383/U и UG-387/U для импортных волноводов

Проведение работ по актуализации рассматриваемого государственного стандарта позволит предприятиям, разрабатывающим и эксплуатирующим СВЧ и КВЧ аппаратуру, оснащать её коаксиальными и волноводными соединителями, соответствующими современным метрологическим требованиям. Также это позволяет устанавливать требования к коаксиальным и волноводным соединителям при проведении испытаний в целях утверждения типа (периодической поверке) зарубежных образцов измерительной техники. Внесение изменений в ГОСТ предполагает приведение в соответствие государственных эталонов, обеспечивающих метрологическую прослеживаемость измерений в новых типах соединителей. Введение в ГОСТ 13317 коаксиальных и волноводных соединителей, соответствующих международным стандартам, позволяет отечественным предприятиям производить аппаратуру, которую можно представлять на международном рынке.

Литература

1. IEEE Std 1785.1™-2012 «IEEE Standard for Rectangular Metallic Waveguides and Their Interfaces for Frequencies of 110 GHz and Above — Part 1: Frequency Bands and Waveguide Dimensions».

2. IEEE Std 1785.2™-2016 «IEEE Standard for Rectangular Metallic Waveguides and Their Interfaces for Frequencies of 110 GHz and Above — Part 2: Waveguide Interfaces».
3. IEEE Std 1785.3™-2016 «IEEE Recommended Practice for Rectangular Metallic Waveguides and Their Interfaces for Frequencies of 110 GHz and Above— Part 3: Recommendations for Performance and Uncertainty Specifications».
4. IEEE Std 287™-2007 «IEEE Standard for Precision Coaxial Connectors (DC to 110 GHz)».
5. Improved millimeter waveguide flanges improved component and measurements [Electronic resource]. Article reprint 5A-016. May 2013. URL: <http://www.maurymw.com>.
6. Джуринский К.Б. Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры. СПб.: Медиа Группа Файнстрит, 2014.