

Радиочастотные соединители для устройств космического назначения

Кива ДЖУРИНСКИЙ
kbd.istok@mail.ru
Евгений МИТРОФАНОВ
mitrofanov@okbmei.ru
Светлана МОСАЛОВА
smosalova2014@yandex.ru
Валерий ПАНТЕЛЕЕВ
pantelev@okbmei.ru
Нури ФЕЙЗУЛЛА
f-nuri@yandex.ru

Рассмотрены требования к радиочастотным соединителям для устройств космического назначения. Показана необходимость оптимизации конструкции отечественных герметичных соединителей с целью предотвращения высокочастотных пробоев при работе в вакууме. На примере антенного устройства радиолокационной системы приведено решение проблемы пробоев в соединителях.

Развитие радиолокационных средств космического базирования потребовало создания элементной базы с минимальными размерами и массой, обеспечивающей возможность работы в вакууме при высоком уровне СВЧ-мощности. В таких системах диапазона СВЧ применяют бескорпусные переключающие диоды, резисторы, конденсаторы и другие элементы на тонкопленочных поликорковых платах в герметичных корпусах. Не менее важными элементами аппаратуры являются радиочастотные соединители: герметичные коаксиально-микрополосковые переходы (далее — соединители) и кабельные соединители для вывода сигналов с микрополосковых плат на радиочастотный кабель.

Мощности передатчиков современных космических аппаратов достигают сотен ватт, а потому реальна опасность высокочастотных пробоев, которые приводят к ошибкам передачи и даже выходу аппаратуры из строя. В связи с этим при создании подобной аппаратуры стоит задача предотвращения пробоев при всех тестовых и рабочих режимах эксплуатации.

Один из самых эффективных способов предупреждения пробоев — создание вентиляционных каналов, соединяющих устройство с вакуумным пространством космоса. Благодаря им давление внутри устройства изменится от атмосферного до космического вакуума. Однако даже при наличии вентиляционных каналов в изделии серьезную опасность представляют пробой в микрополосковых линиях усилителей мощности в негерметичных корпусах [1] и в радиочастотных соединителях, в которых имеются замкнутые воздушные полости [2–3].

Рассмотрим проблему пробоев на примере облучателя антенного устройства радиолокационной системы космического базирования. Облучатель предназначен для формирования дискретного набора диаграмм направленности. Формирование происходит путем коммутации мощности СВЧ-сигнала по набору рупорных излучателей. В разрабатываемом антенном устройстве применено 80 миниатюр-

ных герметичных соединителей СРГ50-751 ФВ, ВРО.364.049 ТУ производства ФГУП ПО «Октябрь», г. Каменск-Уральский. Из них 40 соединителей использовались в качестве герметичных вводов в корпуса герметизированных переключателей мощности, а остальные 40 — в коаксиально-волноводных переходах в негерметизированных блоках антенной аппаратуры.

В этом соединителе, являющемся аналогом зарубежного соединителя SMA, применена коаксиальная линия размерами 4,1×1,27 мм, заполненная фторопластом Ф4, герметичность обеспечивается спаем стеклянного изолятора с корпусом. Соединители СРГ50-751ФВ имеют достаточную механическую прочность, большой срок службы, надежность и приемлемый уровень КСВН. По комплексу параметров СРГ50-751ФВ считаются лучшими среди всех отечественных серийно выпускаемых миниатюрных герметичных соединителей [4].

Следует подчеркнуть, что применение этих соединителей было вынужденным. К началу разработки было известно, что конструкция соединителя SMA (а значит, и СРГ50-751ФВ) не оптимизирована для предотвращения коронного и мультипакторного разрядов и перегрева и применение этих соединителей в устройствах космического назначения ограничено их невысокой допустимой мощностью непрерывно пропускаемого СВЧ-сигнала [2].

В изделиях космического назначения общепринято применять соединители типа TNC [2–4]. Однако заменить соединители СРГ50-751ФВ на TNC не представлялось возможным из-за недопустимо больших габаритных размеров и массы, а также из-за отсутствия промышленного изготовления отечественных герметичных соединителей TNC с высоким уровнем параметров.

Во время испытаний антенного устройства произошел пробой в большинстве соединителей СРГ50-751ФВ. Испытания проводились в S-диапазоне частот (3,2 ГГц) при импульсной СВЧ-мощности 600 Вт с длительностью импульса 0,02 мс, подаваемой от магнетронного устройства в каждое коаксиальное сечение соединителей. В процессе термовакуумных испытаний после выдержки для дегазации в течение 300 ч в вакууме 10^{-6} мм рт. ст. подавалась СВЧ-мощность. Виды пробоев в соединителях антенного устройства показаны на рис. 1а, б. Для визуализации области пробоя в соединителе был вырезан сектор (рис. 1а). На рис. 1б видно, что в результате пробоя произошло облуживание фторопластового изолятора вилки. Развитие пробоя привело к перегреву разъемов и нарушению герметизации их паяного соединения с корпусом переключателей мощности с развитием пробоя в самом переключателе (рис. 1в).

Пробой в соединителе с диэлектрическим заполнением мог произойти в результате ионизационного или мультипакторного высоко-

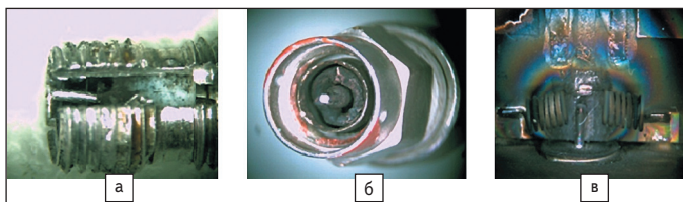


Рис. 1. Пробой в зазоре между:
а) стеклянным и фторопластовым изоляторами;
б) в области соединения вилка—розетка;
в) пробой микрополосковых входов внутри герметизированного переключателя мощности

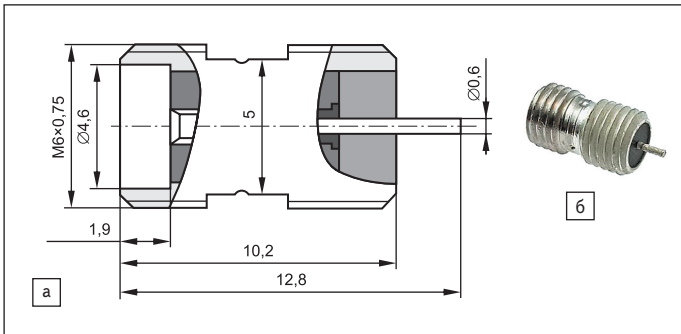


Рис. 2. Соединитель CPГ50-751ФВ: а) конструкция; б) внешний вид

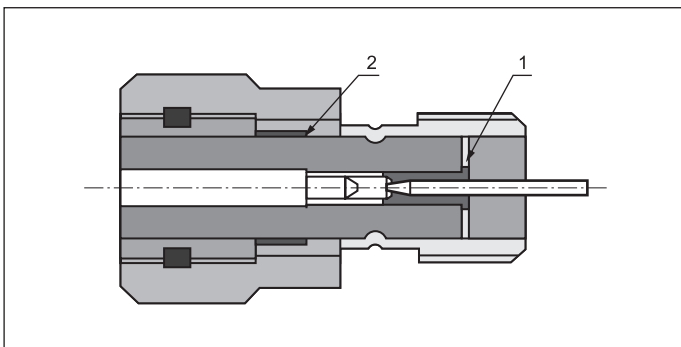


Рис. 3. Соединители в сочлененном состоянии:
1 — розетка CPГ50-751ФВ; 2 — вилка CP-50-726ФВ

частотных разрядов при воздействии СВЧ-поля в замкнутых воздушных полостях (зазорах) между проводниками коаксиальной линии соединителей [2].

Высокочастотный ионизационный разряд, переходящий в коронный разряд, возникает в результате воздействия СВЧ-поля высокой мощности при давлении воздуха несколько миллиметров ртутного столба [2]. Ионизация возникает в результате столкновений свободных электронов с молекулами воздуха. Электрон, возникший при случайной ионизации нейтральной молекулы, ускоряется в электрическом поле и приобретает энергию, достаточную для того, чтобы при столкновении со следующей молекулой ионизовать ее. Изначально низкая плотность электронов лавинообразно возрастает, происходит ионизация молекул кислорода, содержащегося в воздухе, с образованием озона, и возникает свечение голубого цвета, имеющее вид короны. Коронный разряд маловероятен в вакууме при давлении воздуха, меньшем 10^{-3} мм рт. ст. [2].

Мультипакторный (Multipaction Breakdown) вторично-эмиссионный микроволновый разряд может возникнуть в замкнутых полостях соединителя в результате развития электронной лавины, вызванной вторичной электронной эмиссией с поверхности проводников соединителя, бомбардируемых электронами, ускоренными в СВЧ-поле. Разряд происходит в высоком вакууме, когда длина свободного пробега электрона больше, чем расстояние между внутренним и наружным проводниками. Мультипакторный пробой ограничивает пропускаемую мощность соединителя при давлении ниже 10^{-5} мм рт. ст. (такое давление наблюдается на высоте свыше 150 км). При более высоких давлениях вероятность мультипакторного пробоя невелика.

По данным американской компании Gore & Associates [2], для соединителя SMA:

- при соотношении $f \times \delta < 0,7$ ГГц·мм доминирует мультипакторный разряд;
 - при $f \times \delta > 2$ ГГц·мм — ионизационный газовый разряд;
 - при $2 < f \times \delta < 0,7$ ГГц·мм — возможны оба вида разряда;
- где f — частота, ГГц; δ — зазор между проводниками, мм.

Оценим вероятность одного из видов разряда в соединителе CPГ50-751ФВ (розетка). Его конструкция показана на рис. 2, а соединение вилки CP-50-726ФВ и розетки CPГ50-751ФВ — на рис. 3. Выносными линиями 1 и 2 выделены две замкнутые воздушные, плохо вентилируемые полости.

Первая, самая большая полость между фторопластовым и стеклянным изоляторами имеет размеры $4,1 \times 1,8 \times 0,3$ мм. Размеры второй полости в области сочленения вилки и розетки определяются точностью изготовления соединителей. Обе полости являются разрядными промежутками с пониженным давлением воздуха. Для соединителя CPГ50-751ФВ на частоте 3,2 ГГц величина $f \times \delta > 3,7$ ГГц·мм, и поэтому доминирующим следует считать ионизационный разряд в замкнутых воздушных промежутках.

Ориентировочные расчеты, выполненные по методике, приведенной в стандарте ECSS-E-20-01A [5], показывают, что при выдержке в течение 300 ч в вакууме 10^{-6} мм рт. ст. давление воздуха в зазорах соединителя снижается с атмосферного до нескольких мм рт. ст. Кроме того, необходимо учитывать внутреннее газоотделение материалов в зазорах, благодаря которому давление воздуха в них может длительное время на несколько порядков превосходить давление в открытом космосе [1]. Наличие замкнутых зазоров, где давление воздуха значительно превышает давление в вакууме, создает условия для ионизационного газового разряда, переходящего в коронный пробой.

Для предотвращения пробоев в антенном устройстве соединители CPГ50-751ФВ (розетка) и CP-50-726ФВ (вилка) были заменены на герметичные соединители TC2.236.072-01 (розетка) и TC2.236.074 (вилка), разработанные АО «НПП «Исток» [4]. Соединители TC2.236.072-01 и TC2.236.074 имеют воздушную коаксиальную линию размерами $3,5 \times 1,52$ мм. Герметичность обеспечивает спай стеклянного изолятора с корпусом соединителя. Стеклянный изолятор является также опорной шайбой, поддерживающей центральный проводник. Корпус и центральный проводник соединителей покрыты износостойким сплавом золото-кобальт, гнездовой проводник — сплавом палладий-никель. Соединители имеют повышенные радиационную стойкость и допустимую температуру $+320$ °С кратковременного нагрева при пайке в корпуса изделий. Конструкция и внешний вид соединителей TC2.236.072-01 (розетка) и TC2.236.074 (вилка) показаны на рис. 4 и 5, а их соединение — на рис. 6.

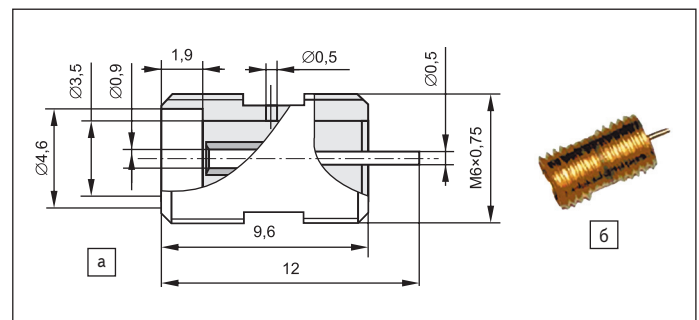


Рис. 4. Соединитель TC2.236.072-01: а) конструкция; б) внешний вид

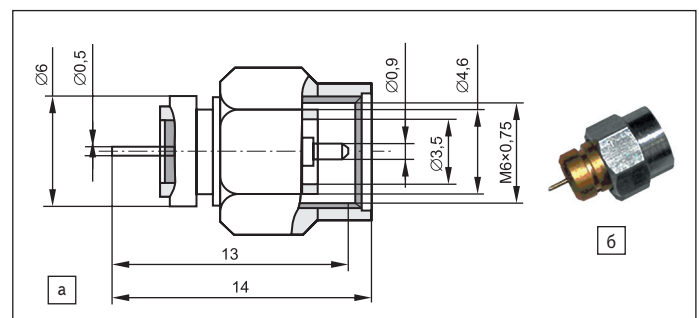


Рис. 5. Соединитель TC2.236.074: а) конструкция; б) внешний вид

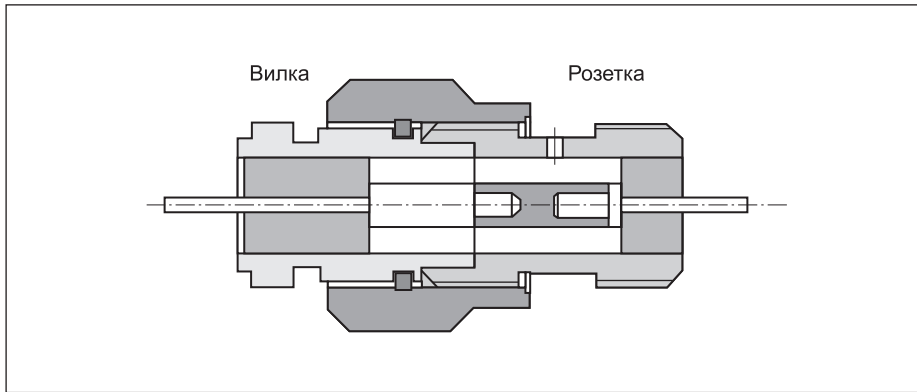


Рис. 6. Соединители TC2.236.072-01 и TC2.236.074 в сочлененном состоянии

В самих соединителях TC2.236.072-01 и TC2.236.074 и в их сочлененном состоянии отсутствуют замкнутые воздушные промежутки. Для гарантии отсутствия пробоев в корпусе соединителя TC2.236.072-01 выполнено вентиляционное отверстие диаметром 0,5 мм, соединяющее внутренний объем с вакуумом. Диаметр отверстия выбран с таким учетом, чтобы не ухудшить радиогерметичность устройства.

Испытания на высоком уровне мощности в вакууме подтвердили высокую электропрочность антенного устройства с соединителями АО «НПП «Исток».

Предложенное решение может служить основой для создания герметичных соединителей «розетка» и «вилка», удовлетворяющих требованиям аппаратуры космического базирования. Отсутствие пробоев должно быть гарантировано проведением испытаний соединения вилки и розетки на соответствие требованиям стандарта ECSS-E-20-01.

Заключение

В настоящее время в номенклатуре серийно выпускаемых отечественных герме-

тичных радиочастотных соединителей отсутствуют соединители категории Space для использования на высоком уровне СВЧ-мощности в аппаратуре космического базирования. Ввиду взятого курса на импортозамещение необходимо создание отечественных сертифицированных соединителей в соответствии с требованиями стандарта ECSS-E-20-01A.

Литература

1. Былкин В. И., Гаврилов И. А. СВЧ-пробой в микрополосковой линии при пониженном давлении газа. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. Вып. 1.
2. Gore W. L. High Power Operation of Coaxial Assemblies. Spaceflight Applications. www.gore.com
3. Karstensen H., Fuchs J., Wettstein K., Raboso D., Sorolla E., Mattes M., Schönherr D., Hartnagel H. L. Power Sub-Miniature "PSM" Connectors for Space Applications. Space Passive Component Days, 1st International Symposium. 24–26 September 2013. ESA/ESTEC, Noordwijk, Netherlands.
4. Джурицкий К. Б. Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры. Под ред. д. т. н. Борисова А. А. СПб: Файнстрит, 2014.
5. Стандарт ECSS-E-20-01A. Rev.1, March 2013.