

Радиочастотные электрические соединители.

Вопросы теории и состояние развития производства

Современный технический уровень отечественных радиочастотных соединителей не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к радиоэлектронным компонентам, необходимым для комплектования РЭА нового поколения. Научно-технический задел, позволявший ранее отечественным соединителям в основном соответствовать зарубежным аналогам, в настоящее время становится недостаточным для поддержания уровня отрасли. Отставание от зарубежного уровня все более увеличивается. Решить задачу создания соединителей с высокими техническими параметрами можно лишь путем теоретического и экспериментального исследований, на основе использования современных технических решений.

**Александр Сафонов
Леонид Сафонов**

edet@online.debryansk.ru

Введение

Электрические контакты, а соответственно и электрические соединители, являются неотъемлемыми элементами любой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). С увеличением сложности разрабатываемой РЭА значительно возрастает и количество электрических соединителей. Если раньше на стадии развития радиоэлектроники отдельные радиоэлектронные приборы содержали не более десятка электрических контактов, то теперь некоторые современные радиоэлектронные устройства, особенно наземной РЭА, насчитывают уже более 300–500 тысяч электрических контактов.

Современное развитие промышленности, авиации, космонавтики, оборонной техники и средств связи требует создания еще более сложных высокотехнологичных наукоемких электрических соединителей с достаточно высокой степенью надежности. В последнее время на передовые позиции выходит применение многофункциональных соединителей, которые позволяют организовывать в РЭА не только цепи управления и питания, но и передачу высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов, производить соединение оптоволоконных кабелей, передавать электромеханические, пневматические и другие сигналы.

Несмотря на важность функций, которые они выполняют, и на такое широкое применение контактов, их надежность еще недостаточна и зачастую значительно снижает надежность всего радиоэлектронного устройства.

Так, например, в мощных передатчиках нередки случаи обгорания контактов, искажения формы и амплитуды проходящего через них сигнала, излучения электромагнитной энергии из переходной зоны, появления выброса ложного сигнала или провала рабочего, самовозбуждения колебательного контура и т. д.

Из-за плохих контактов в приемной аппаратуре возникают ложные сигналы, а контактные шумы

по своему уровню могут превышать принимаемые сигналы. Причем для электрических контактов характерно, что отказы происходят не столько при испытаниях и настройке, а значительно позже — в процессе эксплуатации, когда аппаратура должна работать с высокой степенью надежности и когда отказы могут привести к серьезным последствиям.

Решить задачу создания надежных электрических соединителей с контактами требуемых параметров можно лишь путем теоретического и экспериментального исследования физических явлений, происходящих при работе контактов при различных режимах эксплуатации и условиях воздействия внешних факторов.

Несмотря на большое число работ и разнообразие их направлений, проблема создания высоконадежных электрических соединителей до сих пор в полной мере не решена. При этом необходимо особо отметить недостаточность работ по исследованию и разработке высокочастотных и сверхвысокочастотных контактов с требуемыми техническими характеристиками.

В связи с этим авторы предлагают рассмотреть основные теоретические положения и практические разработки по теории «неподвижного» электрического контакта, большое внимание уделяется при этом анализу работы контактов на высоких и сверхвысоких частотах. Приводится анализ состояния и перспектив развития радиочастотных электрических соединителей.

Основы теории и расчета переходной зоны электрических контактов

Контактное и переходное сопротивление

Сопротивления двух стержней одинакового размера, выполненных из одного материала, но одного целого, а другого — состоящего из двух отрезков (рис. 1), различны.

Сопротивление составного стержня больше, чем целого, на величину сопротивления в зоне соприкос-

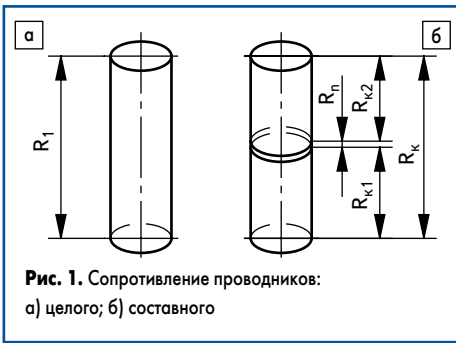


Рис. 1. Сопротивление проводников: а) целого; б) составного

новения отрезков, которое называется переходным сопротивлением R_n .

Контактное сопротивление равно сумме переходного и омического сопротивления обоих контактов между точками присоединения проводов:

$$R_k = R_n + R_{u1} + R_{u2}, \quad (1)$$

где R_{u1} и R_{u2} — сопротивления активных участков штыревой и гнездовой частей контактной пары.

При эксплуатации соединителей контактное сопротивление изменяется в основном за счет изменения переходного сопротивления.

Природа переходного сопротивления до сих пор полностью не выяснена. Существует несколько различных теорий по этому вопросу, но наибольшее распространение получили две основные теории контактного сопротивления — В. Чельхлина и Р. Хольма, эти теории основаны на несколько различной природе этого явления, но приводят тем не менее к одинаковому результату. В первом случае возникновение переходного сопротивления объясняется сопротивлением микровыступов, проводящих электрический ток, во втором — сопротивлением стягивания линий электрического тока к проводящим участкам микровыступов. При увеличении контактного давления микровыступы сплющиваются, увеличивая поверхность фактического контакта и, соответственно, уменьшая сопротивление выступов и величину стягивания.

Для чистой плоской контактной поверхности переходное сопротивление, рассчитанное с помощью обеих теорий, будет равно:

$$R_n = \rho K / P_k, \quad (2)$$

Теория Р. Хольма более полно отражает явления в переходной зоне контактов и поэтому получила большее распространение. Модель контактной поверхности по теории Р. Хольма показана на рис. 2.

Вся поверхность контактирования, площадь которой определяется по формуле Герца, является кажущейся. Вследствие ее шероховатости контакты соприкасаются лишь на отдельных участках, суммарная площадь которых называется фактической, или эффективной. Обе поверхности контактов обычно покрыты окисными пленками, которые при приложении к ним контактных давлений разрушаются. В результате образуются участки с контактированием чистых металлических поверхностей (участки а). Участки с металлической про-

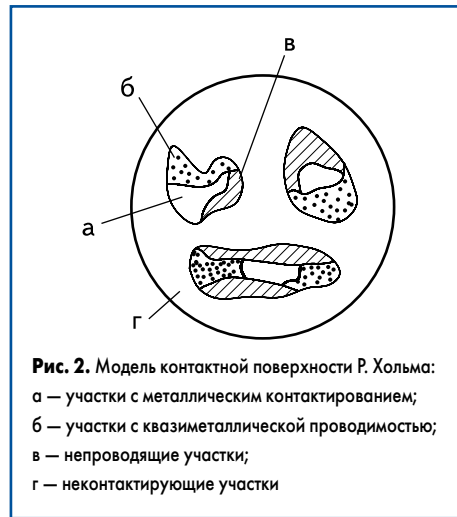


Рис. 2. Модель контактной поверхности Р. Хольма: а — участки с металлическим контактированием; б — участки с квазиметаллической проводимостью; в — непроводящие участки; г — неконтактирующие участки

водимостью образуются также в результате фриттинга, то есть пробоя окисной пленки под действием электрического поля и образования канала, производящего ток. Более прочные участки пленки при сжатии приобретают свойства полупроводников с большим удельным сопротивлением. Их проводимость называется квазиметаллической (участки б). Участки, на которых при контактировании разрушение пленки не произошло, электрический ток не проводят (участки в). Другие участки кажущейся контактной поверхности не контактируют (участки г), они разделены газовыми промежутками и также не проводят электрический ток. Остатки разрушенных окислов, пыль и продукты износа, накапливаясь во впадинах шероховатой поверхности, упрочняются и препятствуют сближению контактов и образованию новых пятен с металлической проводимостью, что в свою очередь ведет к увеличению переходного сопротивления. Ток, проходя из одного контакта в другой, стягивается к проводящим участкам (рис. 3), где его плотность может достигать очень большой величины (до 1×10^5 А/мм²).

Металлические и квазиметаллические участки проводимости примерно равномерно распределены по контактной площадке для случая контактирования двух плоскостей, когда средняя величина удельного давления постоянна в любой точке поверхности. При контактировании сферических поверхностей удельное давление изменяется по эллиптическому закону, убывая от центра контактной площадки к периферии, и на границах площадки равно нулю (задача Герца). В соответствии с этим соотношение числа участков с металлической и квазиметаллической проводимостью изменяется: в центре преобладают участки с металлической проводимостью, на периферии — с квазиметаллической. Причем на граничной полосе находится зона, состоящая только из участков с квазиметаллической проводимостью. Это очень важно при работе на высоких частотах проходящего тока, когда ток смещается к наружной поверхности, покрытой окисными пленками с высоким сопротивлением, то есть в зону с квазиметаллической проводимостью. Поэтому с увеличением частоты тока переходное сопротивление контактных пар возрастает особенно интенсивно, начиная

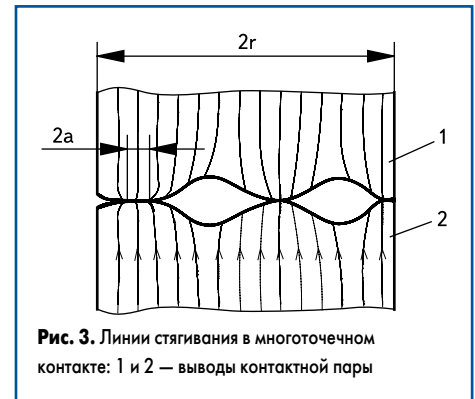


Рис. 3. Линии стягивания в многоточечном контакте: 1 и 2 — выводы контактной пары

с 20 кГц. На СВЧ сопротивление контактных пар значительно больше сопротивления при работе на постоянном токе.

В общем случае переходное сопротивление контактов обусловлено сопротивлением стягивания R_c и сопротивлением поверхностной пленки R_{nl} :

$$R_n = R_c + R_{nl}. \quad (3)$$

Сопротивление стягивания R_c обусловлено шероховатостью поверхности контактов и характером контакта (многоточечный). Сопротивление поверхностной пленки R_{nl} обусловлено наличием непроводящих или полупроводящих пленок на поверхностях контактирования.

Сопротивление стягивания выступов с радиусом площадки касания (а) равно:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right), \quad (4)$$

где r — радиус цилиндрического тела контакта; a — радиус площадки контактирования одного выступа.

Так как обычно $r \gg a$, то можно принять, что:

$$R_c = \rho / 2a. \quad (5)$$

При контактировании выступов из разных материалов:

$$R_c = (\rho_1 + \rho_2) / 4a. \quad (6)$$

Для многоточечного контакта из N одинаковых контактных точек истинная (фактическая) площадь контактирования $F = \pi a N$, следовательно:

$$R_c = \frac{\rho}{2Na} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi}{NF}}. \quad (7)$$

Площадь контактирования, нагруженная до предела текучести H наиболее мягкого материала контакта, определяется контактным усилием:

$$F = P_k / H. \quad (8)$$

Следовательно, для фактически чистых поверхностей контактов, принимая контактную прочность равной твердости по Бринеллю, имеем:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H \bar{B}}{N P_k}} \quad (9)$$

Поверхностное сопротивление обусловлено в основном сопротивлением квазиметаллических участков, так как сопротивление металлических участков сравнительно мало.

Сопротивление однородных пленок равномерной толщины с одинаковым удельным сопротивлением можно определить по формуле:

$$R_{пл} = (\rho_{пл} d) / F, \quad (10)$$

где $\rho_{пл}$ — удельное сопротивление пленок, Ом·мм; d — суммарная толщина пленок, мм; F — площадь квазиметаллических участков, мм².

Произведение $\rho_{пл} d$ практически удобнее заменить удельным туннельным сопротивлением σ [Ом·мм²], тогда сопротивление пленок будет:

$$R_{пл} = \sigma / \pi a^2. \quad (11)$$

Значения поверхностных сопротивлений окисных пленок основных контактных материалов приведены в таблице.

Таблица. Поверхностное сопротивление пленок основных контактных металлов

Материал контактов	σ , Ом·см ²
Золото	5×10^{-9}
Серебро	5×10^{-9}
Платина	5×10^{-9}
Медь	$1,5 \times 10^{-8}$
Никель	2×10^{-8}

С учетом (5) и (11) выражение (3) для переходного сопротивления примет вид:

$$R_n = \rho / 2a + \sigma / \pi a^2. \quad (12)$$

Эта формула справедлива для прочных тонких пленок при небольших контактных усилиях. При значительных контактных усилиях поверхностные пленки разрушаются, размеры контактных металлических поверхностей увеличиваются, и переходное сопротивление практически полностью определяется сопротивлением стягивания.

Современные исследования показывают, что полная проводимость контактов гораздо сложнее и состоит из следующих видов: металлической, квазиметаллической (полупроводниковой), холодной эмиссии, термоэмиссии, газового разряда, электрохимической и термо-ЭДС. Однако основное влияние на проводимость оказывают два первых вида проводимости — металлическая и квазиметаллическая. Сочетанием всех видов проводимости объясняется явление контактной проводимости в разомкнутых контактах и отсутствие проводимости в замкнутых, а также явление «сухого контакта».

Существующие теории переходного сопротивления не в полной мере объясняют все явления, происходящие при прохождении через контакты высокочастотных токов, например повышение R_n , возникновение реактивного

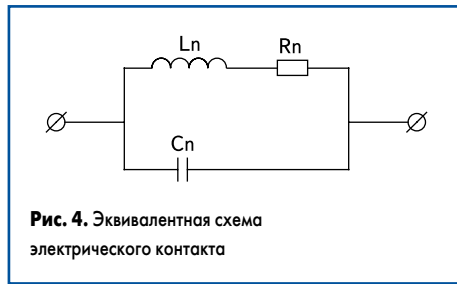


Рис. 4. Эквивалентная схема электрического контакта

сопротивления, искажение электрического сигнала, проходящего через контакты, и переходных процессов, возникающих при этом.

Схему работы электрического контакта целесообразно в общем виде представить так, как показано на рис. 4.

Переходная зона, как и всякое сопротивление, обладает индуктивностью и емкостью, которые образуют реактивное сопротивление этой зоны. В новых контактах, а также в контактах, покрытых благородными металлами и их сплавами (золото, серебро, палладий и др.), при достаточном контактном давлении число участков с квазиметаллической проводимостью незначительно и их влиянием можно пренебречь. При низких частотах и на постоянном токе влияние реактивного сопротивления пренебрежимо мало, на высоких частотах реактивная составляющая переходного сопротивления оказывает решающее влияние на работу электрических контактов.

Активная составляющая переходного сопротивления

Приближенный расчет активной составляющей переходного сопротивления $R_{Пао}$ [Ом] можно произвести по известной формуле:

$$R_{Пао} = \rho C \frac{\sqrt{H \bar{B}}}{P_k^b}, \quad (13)$$

где C — коэффициент, зависящий от способа, чистоты обработки и состояния поверхности (для очень грубой поверхности $C = 3$, для грубой $C = 2$, для чисто обработанной $C = 1$); $H \bar{B}$ — поверхностная прочность по Бринеллю, кгс/мм²; P_k — контактное усилие, кгс; b — показатель степени, зависящий от характера деформации, вида и формы зоны контактирования:

- при нагрузке ниже предела упругости $b = 0,33$;
- при нагрузке выше предела упругости $b = 0,5$;
- при наличии изолирующей пленки $b = 0,7-1$;
- при контактировании по плоскости $b = 2$.

Если контакты выполнены из различных материалов, то:

$$\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2,$$

где ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления материалов первого и второго контактов.

Значение твердости выбирается по наиболее мягкому материалу.

Более точный расчет активного сопротивления переходной зоны чистых контактов можно выполнить по формуле:

$$R_{Пао} = \frac{\rho C}{2 A_k} (R h_m^{2\nu})^{\frac{1}{2\nu+1}} \left(\frac{E}{q_c} \right)^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}, \quad (14)$$

где A_k — кажущаяся контактная поверхность, мм²; R — радиус выступов микронеровностей, мм; h_m — максимальная высота микровыступов, мм; E — модуль упругости первого рода, кгс/мм²; q_c — контурное давление, приходящееся на единицу кажущейся поверхности, кгс/мм²; C — коэффициент, зависящий от качества обработки поверхности контактов:

$$C = \left(\frac{\pi^2 2^{2\nu+3} \nu^{\nu-1,5}}{b^2} \right)^{\frac{1}{2\nu+1}} \left(\frac{K_2 (\nu-1)}{0,75(1-\mu)^2} \right)^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}, \quad (15)$$

где b , K_2 и ν — параметры, зависящие от вида обработки контактных поверхностей.

Активное переходное сопротивление при высоких частотах

С повышением частоты ток вследствие поверхностного эффекта смещается от центра к периферии контактной зоны. В результате этого при работе контакта используется только наружная зона кажущейся контактной поверхности. Для круглой кажущейся поверхности площадь наружной зоны можно вычислить по формуле:

$$A_{эф.кр.} = \pi(D\delta - \delta^2), \quad (16)$$

где D — диаметр кажущейся поверхности, мм; δ — средняя глубина проникновения тока, мм:

$$\delta = 0,05 \sqrt{\frac{\rho}{f \mu_1}}, \quad (17)$$

где f — частота тока, МГц; μ_1 — относительная магнитная проницаемость материала контакта; ρ — удельное электрическое сопротивление, мкОм·см.

При работе контактов на СВЧ величиной δ_2 при расчетах можно пренебречь.

Для прямоугольной кажущейся поверхности площадь наружной зоны вычисляется по формуле:

$$A_{эф.пр.} = \delta \times l, \quad (18)$$

где l — длина проводящей стороны площади касания, мм.

Активную составляющую переходного сопротивления для контактной площадки круглой формы при $k_a \geq 10$ можно вычислить по формуле:

$$R_{Па.кр} = \frac{C \times 10^{-7}}{6,32 D} \sqrt{\rho f \mu_1} (R h_m^{2\nu})^{\frac{1}{2\nu+1}} \left(\frac{E}{q_{c\delta}} \right)^{\frac{2\nu-1}{2\nu+1}}, \quad (19)$$

где $q_{c\delta}$ — средняя величина удельного давления на проводящем участке переходной зоны; a — радиус контактной площадки; k — коэффициент вихревых токов.

Для случая взаимодействия шаровых поверхностей $q_{c\delta}$ равна:

$$q_{c\delta} = \frac{q_m}{a\delta} \left[\frac{\pi a^2}{2} - (a-\delta)\sqrt{2a\delta - a^2} \arcsin \frac{a-\delta}{a} \right], \quad (20)$$

где a — радиус контактной площадки, который находится из уравнений Герца:

$$a = 0,721 \sqrt{P_k 2r_{np} \left[\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right]}, \quad (21)$$

q_m — максимальное контактное давление в центре контактной зоны, которое определяется по уравнениям Герца:

- для шаровых поверхностей:

$$q_m = 0,616 \sqrt[3]{\frac{P_k E_{np}^2}{r_{np}^2}}; \quad (22)$$

- для двух цилиндров с параллельными осями:

$$q_m = 0,591 \sqrt[3]{\frac{P_d E_{np}}{D_{np}}}; \quad (23)$$

где P_d — усилие, приложенное к участку контактирования единичной длины.

Для прямоугольной формы контактной площадки при условии $k_\alpha \geq 10$ активная составляющая переходного сопротивления равна:

$$R_{IIa,np} = \frac{C \times 10^{-6}}{2l} \sqrt{\rho f \mu_1} (R h_m^{2\nu})^{\frac{1}{(2\nu+1)}} \left(\frac{E}{q_{c\delta}} \right)^{\frac{(2\nu-1)}{(2\nu+1)}}, \quad (24)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м; k — коэффициент вихревых токов, который рассчитывается по формуле:

$$k = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_1}{\rho \times 10^{-2}}}. \quad (25)$$

При сферической форме контактов давление в зоне контактирования распределяется по закону эллипса, описываемому уравнениями Герца: в центре давление максимально, а на периферии снижается до нуля. Поэтому активная составляющая переходного сопротивления для сферических контактов с увеличением частоты будет возрастать интенсивнее, чем для контактов с приработанными или плоскими рабочими поверхностями.

Емкость переходной зоны

Соприкасающиеся контактные поверхности имеют всегда определенную шероховатость, поэтому фактическое их касание происходит только в отдельных точках (выступах). Другие выступы в момент касания поверхностей находятся на расстоянии, которое соизмеримо с размерами атомов, и образуют участки с высокой локальной емкостью, соединенные параллельно с проводящими участками. При наличии поверхностной пленки на контактах в некоторых точках касания при удельных давлениях ниже предела прочности пленки она не разрушается. Если к тому же пленка обладает изолирующими свойствами, то в этом случае также образуются участки с большой

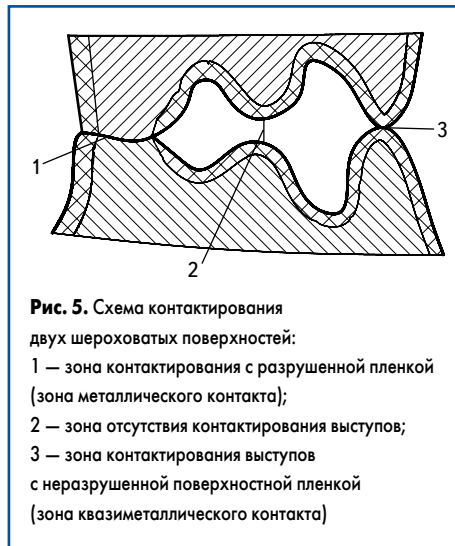


Рис. 5. Схема контактирования двух шероховатых поверхностей:

- 1 — зона контактирования с разрушенной пленкой (зона металлического контакта);
- 2 — зона отсутствия контактирования выступов;
- 3 — зона контактирования выступов с неразрушенной поверхностной пленкой (зона квазиметаллического контакта)

локальной емкостью. В общем виде переходная емкость при постоянном токе двух шероховатых контактов будет равна сумме емкостей каждого выступа:

$$C_{no} = C'_k + C''_k + C_n = \sum_{i=1}^{n'} C'_{ki} + \sum_{i=1}^{n''} C''_{ki} + \sum_{i=1}^n C_{Hi}, \quad (26)$$

где C_{no} — переходная емкость двух контактов; C'_k — емкость контактирующих выступов с разрушенной поверхностной пленкой; C''_k — емкость контактирующих выступов с неразрушенной поверхностной пленкой; C_n — емкость неконтактирующих выступов.

Схема контактирования двух шероховатых поверхностей представлена на рис. 5.

Закон распределения выступов по высоте при наличии большого их количества задается непрерывной функцией. При этих условиях наименьшее внедрение выступов — a_n , при котором начинается разрушение пленки, его можно вычислить исходя из формулы Герца:

$$a_n = \frac{2,5R(1-\mu^2)^2}{E^2} \times \sigma_B^2, \quad (27)$$

где R — приведенный радиус микронеровностей контактирующих поверхностей:

$$R = (R_1 R_2) / (R_1 + R_2); \quad (28)$$

E — приведенный модуль упругости контактирующих поверхностей:

$$E = (E_1 E_2) / (E_1 + E_2); \quad (29)$$

σ_B — предел прочности пленки при сжатии, кгс/мм².

Если фактическое внедрение двух поверхностей будет меньше a_n , то поверхностные пленки не разрушаются, и контакты, касаясь, не будут проводить ток. При внедрении, большем a_n , часть пленок разрушится, и образуются участки с металлической проводимостью.

Зная законы распределения выступов по высоте и параметры шероховатостей контактных поверхностей, можно определить вероятность встречи выступов и разрушения пленки, рассчитать переходную емкость C_{no} контактной пары. Считая распределение выступов по вы-

соте равномерным, величину переходной емкости можно вычислить по формуле:

$$C_{no} = \frac{5,82 \varepsilon_0 \sqrt{R P_k} (1-\mu)^2}{E a_m^{3/2}} \times \left[2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 \frac{(h_m - a_m)^2}{a_m^2} + 4\varepsilon_1 h \times \left(\frac{0,5}{\sqrt{h_m - a_m + a_{II}}} + \frac{1}{\sqrt{a_m - a_{II}}} \right) + \frac{\varepsilon_{нл} a_n^2 (2a_m - a_{II})}{a_m^2 (h_{нл1} + h_{нл2})} \right], \quad (30)$$

где a_m — наибольшее внедрение выступов:

$$a_m = \left[\frac{0,75(1-\mu^2)\pi}{K_2 \nu (\nu-1) \varepsilon} \right]^{\frac{2}{(2\nu+1)}} \times \left(\frac{q_c}{E} \right)^{\frac{2}{(2\nu+1)}} (h_m^{2\nu} R)^{\frac{1}{(2\nu+1)}}, \quad (31)$$

ε_0 — диэлектрическая постоянная, равная $\varepsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12}$ Ф/м; ε_1 — относительная диэлектрическая проницаемость воздушного промежутка между контактными поверхностями; $\varepsilon_{нл}$ — относительная диэлектрическая проницаемость на обеих поверхностях контактов.

Параметры контактных поверхностей выбираются в зависимости от качества их обработки. Для чистых контактных поверхностей наименьшую величину внедрения выступов a_n в формуле для определения величины переходной емкости C_{no} можно принять равной нулю. С увеличением чистоты обработки и притирки контактов переходная емкость возрастает.

Переходная емкость на высоких частотах

На высоких частотах электрический ток смещается к периферии контактной зоны, вследствие этого эффективная поверхность, создающая переходную емкость, уменьшается, а следовательно, уменьшается и величина переходной емкости. У сферических контактов на периферии снижается также контактное давление, что приводит к еще большему уменьшению переходной емкости. Расчет переходной емкости при работе контактов на ВЧ и СВЧ необходимо производить по формуле (30), вычисляя при этом величину контактного усилия по формуле:

$$P_k = q_{c\delta} \times A_{зф}, \quad (32)$$

где значение средней величины удельного давления на проводящем участке переходной зоны — $q_{c\delta}$ — определяется выражением (20), $A_{зф}$ — выражением (16) или (18).

Расчет наибольшего внедрения a_m производится по формуле (31) при условии, что q_c — контурное давление, приходящееся на единицу кажущейся поверхности, — равно $q_{c\delta}$, то есть $q_c = q_{c\delta}$.

В случае приработанных контактов или взаимодействия двух контактов по плоско-

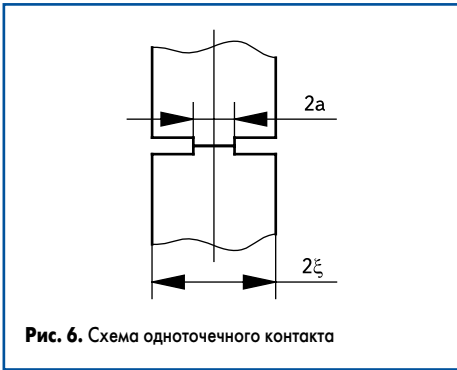


Рис. 6. Схема одноточечного контакта

сти, когда контактные давления постоянны в любой точке контакта, уменьшение переходной емкости пропорционально уменьшению эффективной контактной поверхности, следовательно:

$$C_{П} = C_{П0} / (A_{эф} / A_k), \quad (33)$$

где $C_{П0}$ — переходная емкость при постоянном токе.

Индуктивность переходной зоны

Переходная зона электрических контактов, как и любое сопротивление, обладает индуктивностью, которая называется переходной. Для одноточечного контакта (рис. 6) диаметром 2ξ и с радиусом контактной площадки a индуктивность на постоянном токе можно определить по формуле:

$$L_{П0} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \left(0,386 \sqrt{\xi^2 - a^2} - \frac{4a - 3a^2}{3} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\xi^2 - a^2}}{a} \right), \quad (34)$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость материала контактов; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м; ξ и a — радиусы контакта и площадки касания, м.

Переходное сопротивление при работе на высоких частотах

Как показано на рис. 4, эквивалентная схема контактной пары представляет собой трехэлементный двухполюсник с сосредоточенными параметрами $R_{П}$, $C_{П}$ и $L_{П}$, причем величина этих параметров зависит от частоты тока.

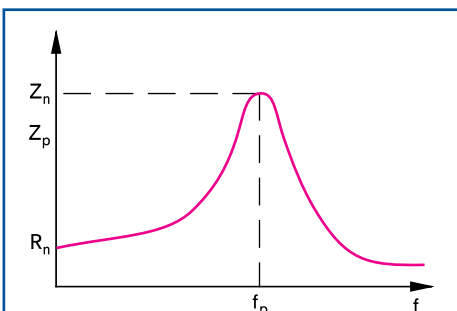


Рис. 7. Зависимость полного переходного сопротивления от частоты

Полное сопротивление переходной зоны контактной пары представляет собой сумму активного R_k и реактивного X_k сопротивлений и вычисляется по формуле:

$$Z_k = R_k + jX_k = \frac{R_{П}}{(1 - \omega^2 R_{П} C_{П})^2 + (R_{П} \omega C_{П})^2} + j \frac{\omega L_{П} (1 - \omega^2 L_{П} C_{П}) - R_{П}^2 \omega C_{П}}{(1 - \omega^2 L_{П} C_{П})^2 + (R_{П} \omega C_{П})^2}. \quad (35)$$

При работе на частотах, равных или близких к резонансной частоте контура, и при $R_{П} \leq \omega L_{П}$ полное сопротивление контура максимально возрастает, и его можно вычислить по приближенной формуле:

$$Z_k = \frac{L_{П}}{R_{П} C_{П}} = \frac{\rho_k^2}{R_{П}}, \quad (36)$$

где ρ_k — характеристическое сопротивление контура.

При отклонении рабочей частоты от резонансной полное сопротивление резко падает и приближается к активному переходному сопротивлению (рис. 7).

Резонансная частота переходной зоны рассчитывается по формуле:

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{П} C_{П}}} \sqrt{1 + \frac{2R_{П}^2 C_{П}}{L_{П}} - (L_{П} C_{П} R_{П})^2}. \quad (37)$$

В случае, когда $(2R_{П} C_{П}) / L_{П} \ll 1$, получим:

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{П} C_{П}}}. \quad (38)$$

Любая контактная пара электрического соединителя характеризуется определенными электрическими и механическими параметрами. К электрическим параметрам относятся:

- переходное R_n и контактное R_k сопротивления;
- максимальный рабочий ток через контактную пару I_{max} ;
- статическая и динамическая нестабильность переходного сопротивления — ΔR_{cm} и ΔR_d соответственно.

Физический смысл и теория возникновения R_n и R_k нами подробно рассмотрены.

Максимальный рабочий ток через контактную пару I_{max} — это наибольший ток, который может быть пропущен через контактную пару без превышения установленного перегрева и потери работоспособности в течение заданного времени.

Нестабильность переходного сопротивления — это величина изменения переходного сопротивления. Нестабильность, проявляющаяся при повторных сочленениях, называется статической нестабильностью ΔR_{cm} , при механических воздействиях — ударах, вибрации и т. п. — динамической нестабильностью ΔR_d . Статическая нестабильность переходного сопротивления равна среднеквадратическому отклонению переходного сопротивления от его среднего значения:

$$\Delta R_{cm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_n - R_{ni})^2}{n}}, \quad (39)$$

где n — количество контактов (не менее 3).

Динамическая нестабильность переходного сопротивления характеризует возможный уровень контактных шумов и определяет виброустойчивость конструкции контактов и всего электрического соединителя. Относительная величина динамической нестабильности определяется как отношение наибольшего размаха колебаний переходного сопротивления к величине переходного сопротивления, установленной техническими условиями на контакт:

$$\Delta R_d = ((R_{кнб} - R_{кнм}) / R_{к.норм}) \times 100\%, \quad (40)$$

где $R_{кнб}$ и $R_{кнм}$ — наибольшее и наименьшее значения контактного сопротивления при вибрации.

Радиочастотные контакты, кроме указанных выше параметров, характеризуются также максимальной частотой тока f_{max} , допустимой P_d и номинальной P_n мощностями и коэффициентом стоячей волны по напряжению КСВН.

Максимальная частота тока определяется верхним пределом контактного сопротивления. При увеличении частоты относительно f_{max} контактное сопротивление возрастает сверх предела, установленного ТУ. Допустимая мощность P_d характеризуется наибольшей мощностью, которая может быть передана через контактные группы без перегрева контактов и изоляции в любом режиме работы, в том числе и в режиме стоячих волн.

Номинальная мощность P_n — это мощность, которая может быть передана через контактные группы без нагрева контактов и изоляции сверх допустимой температуры в режиме бегущей волны.

Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) определяется отношением напряжений в режиме стоячих волн. В режиме бегущих волн КСВН равен единице.

Радиочастотные контакты характеризуются также напряжением короны U_k , то есть минимальным напряжением, при котором начинается пробой изоляции.

К механическим параметрам относятся:

- усилие сжатия контактов, называемое контактным давлением P_k ;
- наименьшие усилия соединения и разъединения контактов, называемые соответственно усилием сочленения S_c и усилием расчленения S_p ;
- износостойчивость контактов, которая характеризуется предельным количеством сочленений-расчленений, после которых переходное сопротивление выходит за пределы допустимого, оговоренного ТУ.

Радиочастотные контакты подразделяются на:

- высокочастотные (ВЧ), работающие в диапазоне 15–20 кГц до 30 МГц;
- сверхвысокочастотные (СВЧ), работающие в диапазоне от 30 МГц и выше.

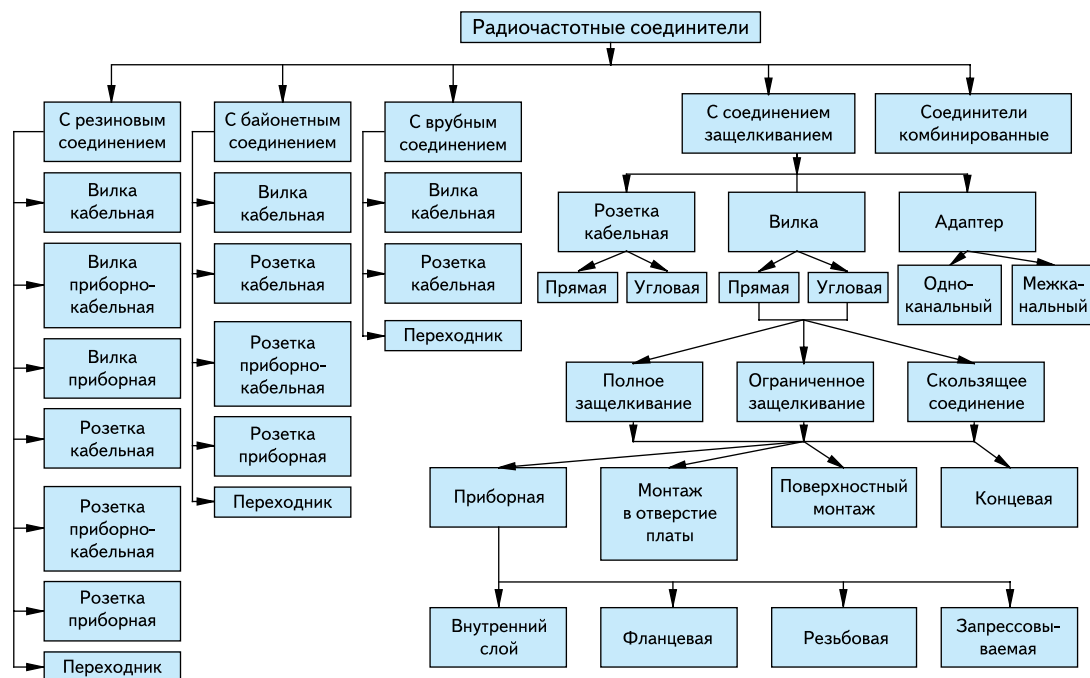


Рис. 8. Классификация радиочастотных электрических соединителей

Существующие сегодня конструкции и исполнения радиочастотных соединителей, предназначенных для различных изделий электроники и микроэлектроники СВЧ специального и общепромышленного применения, можно классифицировать по признакам, указанным на рис. 8.

В России по конструктивному исполнению радиочастотные соединители подразделяются на кабельные, приборно-кабельные, приборные и переходы. Кабельные соединители служат для соединения между собой кабелей и не имеют элементов крепления к панели. Приборно-кабельные соединители также выполняют функцию соединения кабелей, но при этом блочная конструкция соединителя крепится к панели. Приборные соединители состоят из двух блочных частей. Переходы служат для соединения двух или более частей соединителей с разными присоединительными размерами. Особую группу соединителей представляют коаксиально-полосковые (микроразрывные) переходы, с помощью которых осуществляется соединение коаксиальных кабелей с полосковыми (микроразрывными) линиями.

За рубежом принята более подробная градация конструктивных исполнений разночастотных соединителей и адаптеров (переходов, переходников).

Законченная конструкция разночастотного соединителя представляет собой сочетание пары вилка и розетка (рис. 9).

Распространено представление, что вилка — это часть пары, которая имеет штыревой контакт, а розетка всегда имеет гнездовой контакт. Однако это представление верно только для резьбового соединения вилки и розетки. Например, в соединителях с механизмом защелкивания вилка, так же как и розетка, может иметь не только штыревой, но и гнездовой контакт. Названия соединителей некоторых

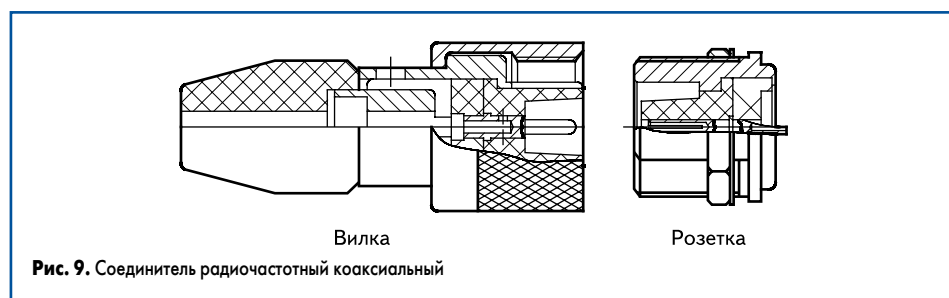


Рис. 9. Соединитель радиочастотный коаксиальный

зарубежных фирм не позволяют сделать однозначный вывод о том, что это — вилка или розетка, и поэтому для уточнения необходима дополнительная информация.

К современным изделиям электроники и микроэлектроники СВЧ предъявляются все более жесткие требования, нередко с технической точки зрения приводящие к совершенно новым решениям: это многофункциональность, повышенная плотность компоновки, минимальные габариты и масса, возможность высокопроизводительной сборки, высокая надежность и т. д. При этом необходимо обеспечить высокий уровень выходных параметров во все возрастающем диапазоне частот, стойкость к воздействию внешних факторов. Все это непосредственно относится и к радиочастотным соединителям.

Современный технический уровень отечественных радиочастотных соединителей не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к радиоэлектронным компонентам, необходимым для комплектации современной радиоэлектронной аппаратуры. На основании анализа технического уровня отечественных радиочастотных соединителей, проведенного ФГУ «22 ЦНИИ Минобороны РФ» и «Фонда УНИЭТ», установлено, что отечественные радиочастотные и СВЧ-соединители уступают зарубежным по габаритам, верхнему значению диапазона рабочих

частот (18 ГГц против 37,5–40 ГГц для радиочастотных и 65–110 ГГц для СВЧ-соединителей), величине максимальной рабочей температуры (155 против 200 °С), значению КСВН (1,15–1,25 против 1,4–2), величине экранного затухания (40–60 против 90 дБ), и для ликвидации этого несоответствия потребуется не менее 10 лет.

Радиочастотные соединители за рубежом разрабатывают и производят несколько десятков фирм, лидирующая роль принадлежит фирмам США. Значительный вклад в эту область вносят также ведущие европейские компании. В последние годы выпуск этих соединителей высокими темпами наращивают Китай и страны Юго-Восточной Азии.

Техника радиочастотных соединителей развивается стремительно. Созданы новые серии ультра- и микроминиатюрных радиочастотных соединителей, соединителей для поверхностного монтажа (предельная частота 65 ГГц), соединителей для диапазона частот от постоянного тока до 110 ГГц, прецизионных соединителей для радиоизмерительной и метрологической аппаратуры.

Конструктивно, в подавляющем большинстве случаев, в соединителях практически всех типов, как отечественного производства, так и импортных, применено стандартное соединение центральных проводников вилки и розетки: штыревой контакт одного соединителя

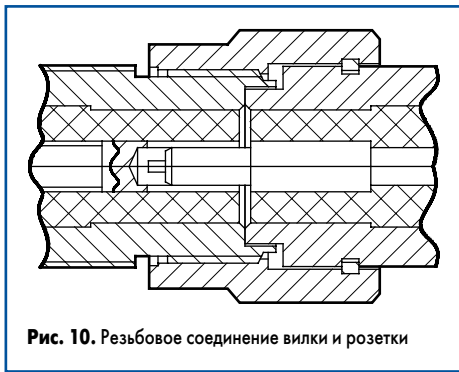


Рис. 10. Резьбовое соединение вилки и розетки

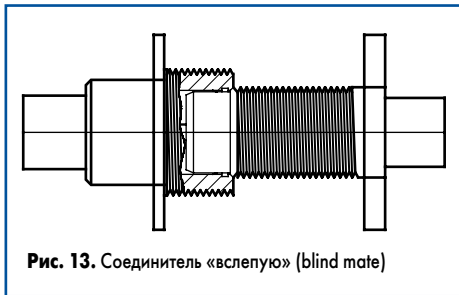


Рис. 13. Соединитель «вслепую» (blind mate)

входит в гнездовой контакт другого и удерживается в нем за счет контактного усилия, создаваемого пружинящим гнездом. Различие в основном состоит в способах соединения наружных проводников вилок и розеток. Наряду с традиционными резьбовыми и байонетными способами соединения в последнее время стали широко применяться:

- Соединение защелкиванием (snap-on), которое, в свою очередь, в зависимости от уровня защелкивания подразделяется на полное (full detent, lock-on), ограниченное (limited detent, half detent) и скользящее (slide on smooth bore).
- Соединение с подпружиненными наружными контактами вилки и стопорной муфтой slide-lock (guick-lock) сочетает в себе высокий уровень параметров резьбового соединения и быстроту соединения защелкиванием.
- Соединение «вслепую» (blind mate) обеспечивает быстрое соединение вилки с розеткой при значительной аксиальной и радиальной неплоскостности в момент стыковки.
- Соединение push-pull с оригинальной системой самозащелкивания и обеспечения качественного соединения при значительной аксиальной и радиальной несоосности.

Перечисленные схемы радиочастотных соединителей представлены на рис. 10–14.

Заключение

Установлено, что технический уровень отечественных радиочастотных соединителей в настоящее время не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к радиоэлектронным компонентам, необходимым для комплектации современной РЭА. Особенно наглядно это проявляется при анализе массогабаритных характеристик, верхних диапазонов рабочих частот, максимальной рабочей температуры, значений КСВН (коэффициента стоячей волны по напряжению), величин экранного затухания и т. д.

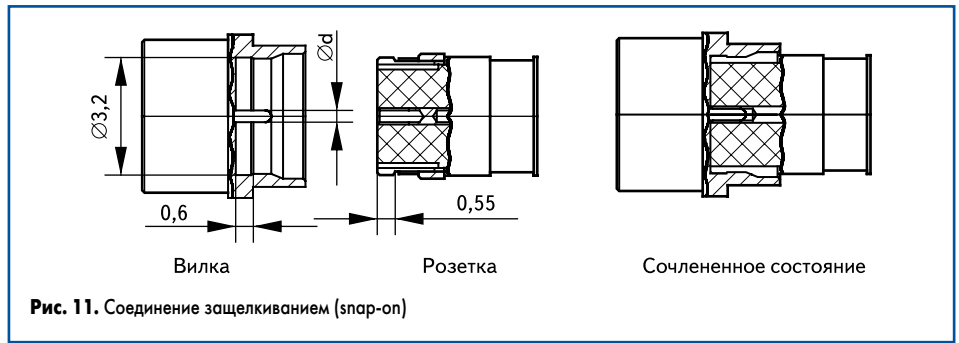


Рис. 11. Соединение защелкиванием (snap-on)

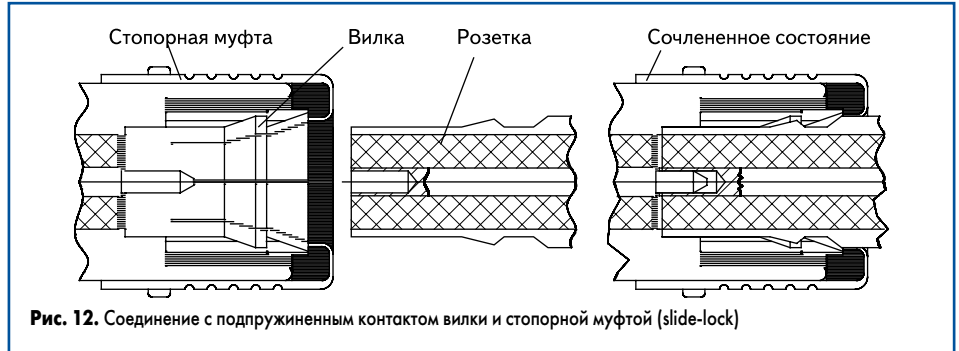


Рис. 12. Соединение с подпружиненным контактом вилки и стопорной муфтой (slide-lock)

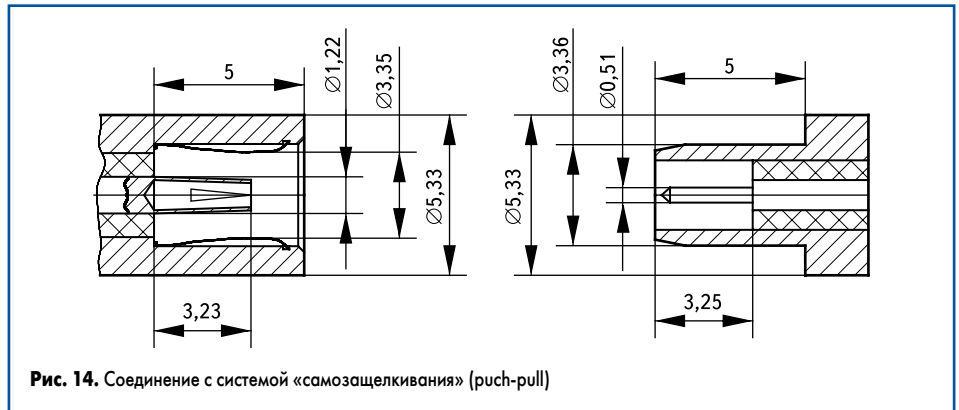


Рис. 14. Соединение с системой «самозащелкивания» (push-pull)

По выводам некоторых компетентных организаций, отставание достигнутого уровня развития производства отечественных радиочастотных соединителей характеризуется как сильное — более 15 лет или необратимое.

Такое отставание возникло по ряду причин:

- Научно-технический задел, позволявший ранее отечественным радиочастотным соединителям в основном соответствовать зарубежным аналогам, сегодня уже практически исчерпан и становится недостаточным для поддержания их требуемого уровня.
- Отсутствует или находится на недостаточном уровне отечественное производство важнейших конструкционных материалов.
- Научно-технический потенциал существующей отечественной метрологической базы не соответствует современным требованиям.
- Технологическое оборудование отечественных предприятий в большинстве случаев морально и физически устарело и не позволяет поддерживать производство электрических соединителей на необходимом техническом уровне, особенно это касается высокотехнологичных производств и в первую очередь — инструментального производства.

И как следствие этих причин — массовое применение радиочастотных электрических соединителей иностранного производства при разработке и производстве РЭА.

Чтобы ликвидировать отставание отечественного уровня радиочастотных соединителей и обеспечить отечественных разработчиков РЭА радиочастотными соединителями с необходимыми техническими характеристиками, по мнению авторов, необходимо выполнить следующие организационно-технические мероприятия:

- сформировать научнообоснованную, минимально необходимую номенклатуру радиочастотных соединителей;
- определить необходимый уровень технических характеристик радиочастотных соединителей с учетом обеспечения требований разработчиков РЭА на среднесрочную перспективу;
- обеспечить требуемое качество и надежность на этапе разработки за счет привлечения высококвалифицированных специалистов и использования САПР электрических соединителей;
- внедрить современные эффективные методы контроля процессов, измерения параметров и проведения полноценных испытаний в течение всего жизненного цикла соединителей;

- обеспечить создание и внедрение в перспективные конструкторские разработки радиочастотных соединителей новых отечественных высокоэффективных материалов, в том числе и наноматериалов, для достижения эксплуатационных параметров, соответствующих, а в необходимых случаях и превышающих лучшие мировые достижения;
- провести комплексную реструктуризацию и техническое перевооружение действующих производств с целью обеспечения выпуска радиочастотных соединителей с заявленными техническими характеристиками и требуемым качеством.

Выполнение этих мероприятий позволит остановить процесс отставания и перейти к производству высокотехнологичных наукоемких радиочастотных электрических соединителей

с требуемыми техническими характеристиками с необходимой номенклатурой и в нужном объеме.

Литература

1. ГОСТ 20465-85 Соединители радиочастотные коаксиальные. Общие технические характеристики.
2. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
3. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1967.
4. Джурицкий К. Зарубежные радиочастотные соединители. Ключ к информации о соединителях // Компоненты и технологии. 2008. № 11.
5. Савченко В. С., Мельников А. В., Карнишин В. И. Соединители радиочастотные коаксиальные. М.: Советское радио, 1977.
6. Сафонов Л. И., Сафонов А. Л. Электрические прямоугольные соединители. Анализ физических процессов в контактах // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6.
7. Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Электрические прямоугольные соединители. Работа электрических соединителей в цепях с микроточками и микронапряжениями // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 2.
8. Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Электрические прямоугольные соединители. Обеспечение эффективности экранирования за счет применения металлизированных пластмассовых корпусов // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 7.