

Электрические прямоугольные соединители. Анализ физических процессов в контактах

Мы продолжаем цикл статей по прямоугольным электрическим соединителям (ПЭС). В данной статье проводится анализ основных физических процессов, которые происходят в контактах соединителей в процессе эксплуатации, и даются рекомендации по минимизации их отрицательных воздействий.

Леонид Сафонов
Александр Сафонов

edet@online.debryansk.ru

Введение

Электрический контакт является одним из основных элементов любой электрической схемы. В связи с усложнением технических систем растет количество и разнообразие типов и форм контактов, их режимов и условий работы. Роль контактов становится ответственнее как в техническом, так и в технико-экономическом отношении. Все это требует более интенсивного и глубокого изучения физических процессов в различных режимах и условиях работы контактов, методов инженерного расчета и конструирования, правильного нормирования режимов и условий работы, разработки и исследования новых контактных материалов и новых конструктивных форм контактов.

В данной статье излагаются основные принципы действия, физические процессы и явления, происходящие в электрических соединителях, обозначаются основные понятия и их физический смысл. Приводятся факторы, определяющие надежность, долговечность и условия сохраняемости электрических соединителей. Определяются пути повышения надежности и долговечности, излагаются правила эксплуатации.

Контактная поверхность

Поверхность контакта, как и всякого твердого тела, всегда обладает шероховатостью и волнистостью. Приближенно геометрическую модель контактной поверхности можно рассматривать как некоторую волнистую поверхность, на которой расположены сферические выступы. Высота выступов относительно основания волн неодинакова. Статистическое распределение значений высот этих выступов близко к нормальному.

Наличие шероховатости и волнистости приводит к тому, что две поверхности всегда контактируют только в отдельных «пятнах».

Поверхность, представляющая собой совокупность точек, через которые передается давление, называется эффективной поверхностью механического контакта, и если это чистый металл, то есть его поверх-

ность свободна от непроводящих пленок, то такая поверхность будет также являться эффективной поверхностью электрического контакта.

Эффективная поверхность контакта является функцией контактного нажатия.

Под действием усилия нажатия две поверхности сближаются за счет деформации контактирующих выступов, и в соприкосновение входит все большее и большее количество отдельных выступов. Сближение контактирующих поверхностей происходит до тех пор, пока сумма реакций упруго деформированных выступов не будет равна усилию нажатия N , то есть когда:

$$N = \sum_{i=1}^{n_k} N_i,$$

где n_k — количество контактирующих выступов; N_i — реакция выступа, деформированного на величину Δ_i .

Величина эффективной контактной поверхности при этом равна:

$$A_{\text{эфф}} = \sum_{i=1}^{n_k} \Pi r \Delta_i,$$

где r — средний радиус выступов, величина которого определяется чистотой обработки контактных поверхностей.

Зависимость между величиной эффективной контактной поверхности и контактным давлением можно представить в виде:

$$A_{\text{эфф}} = \left(\frac{2,2 \Pi r^{\frac{2}{3}}}{E h_m^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{6}{7}} \times N^{\frac{6}{7}} n_o^{\frac{1}{7}} —$$

для случая контактирования по линии (например, контакт между образующей цилиндра и плоскостью).

$$A_{\text{эфф}} = \frac{2,2 \Pi \times r^{\frac{1}{2}} \times N}{E h_m^{\frac{1}{2}}} —$$

для случая контактирования по плоскости,

где E — модуль Юнга; h_m — максимальная высота выступов; n_0 — общее количество выступов на «кажущейся» контактной поверхности.

При контактных давлениях порядка $0,015 \div 1,0$ кгс, которые обычно имеют место на практике в разъемных контактах, эффективная поверхность контактирования ничтожно мала по сравнению с кажущейся контактной поверхностью. Обычно она составляет от долей до единиц процента.

Механизмы проводимости электрического контакта

Как было уже сказано, эффективная площадь механического контакта в случае чистых металлических поверхностей совпадает с эффективной площадью электрического контакта. Однако понятие чистых металлических поверхностей весьма условно, так как на практике на них обязательно в той или иной мере присутствуют различного рода пленки.

При определенных условиях на поверхностях контактов образуются окисные пленки. Окисные и сульфидные пленки, получившие название пленок потускнения, появляются на большинстве металлических поверхностей при повышенных температурах, повышенной влажности и повышенном содержании в атмосфере сернистого газа.

Кроме перечисленных выше пленок, существенное влияние на работу контактов оказывают органические пленки, которые образуются на любых металлических поверхностях путем адсорбирования молекул органических веществ, которые присутствуют в воздухе, окружающем контакты.

Таким образом, на практике контактные поверхности всегда покрыты пленками, изолирующими их друг от друга.

Проводимость электрического тока через пленки обычно реализуется либо за счет туннельного эффекта, либо путем термоэлектронной эмиссии. Сопротивление электрическому току при этих механизмах проводимости сравнительно велико и даже при малой толщине пленки (порядка $5-10 \text{ \AA}$) достигает десятков Ом. Однако на практике электрические контакты имеют в десятки и сотни раз меньшее сопротивление.

Это объясняется тем, что основным механизмом проводимости электрического контакта является омическая проводимость через участки с чисто металлическим контактом, которые образуются вследствие локального разрушения пленок, так как даже при сравнительно небольшом контактном давлении (порядка $15-100 \text{ г}$) механическое давление, действующее на пленку на отдельных контактирующих выступах, достигает очень больших значений.

Таким образом, основным механизмом проводимости в разъемных электрических контактах является омическая проводимость электрического тока через участки с чисто металлическим контактом. Эмиссионная составляющая проводимости обычно не превышает $1-4\%$ и практически не оказывает существенного влияния на общую проводимость контакта.

Переходное сопротивление

Если на металлическом стержне отметить две точки a и b , как указано на рис. 1, и измерить сопротивление между ними, а затем разрезать стержень на две части, соединить встык и снова измерить это сопротивление, то разность показаний между вторым и первым измерениями дает величину, получившую название переходного сопротивления контакта.

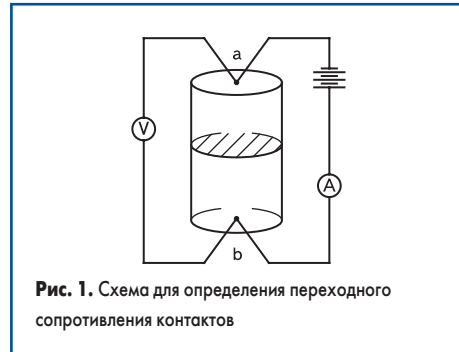


Рис. 1. Схема для определения переходного сопротивления контактов

Природа переходного сопротивления заключается в следующем. При прохождении электрического тока через контакт вследствие малой площади контактных пятен линии тока значительно искривляются, образуя так называемые области «стягивания» (рис. 2).

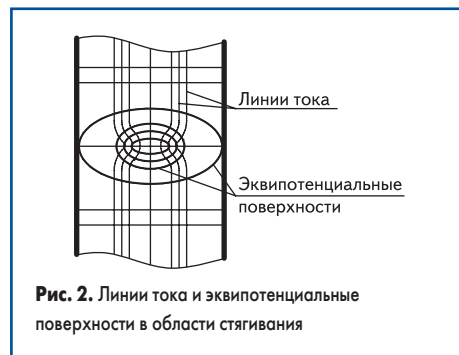


Рис. 2. Линии тока и эквипотенциальные поверхности в области стягивания

За пределами области стягивания плотность тока по всему сечению контактного электрода одинакова, поэтому приращение сопротивления электрода за пределами областей стягивания равно:

$$\Delta R = \rho \Delta l \frac{1}{A_{\text{электр}}},$$

где ρ — удельное сопротивление материала электрода; Δl — приращение длины электрода; $A_{\text{электр}}$ — площадь сечения контактного электрода.

В сечениях контактных электродов, пересекающих области стягивания, плотность тока по сечению неодинакова.

В предельном случае приращение сопротивления равно:

$$\Delta R = \frac{\rho \Delta l}{\sum_{i=1}^{n_k} A_i} = \frac{\rho \Delta l}{A_{\text{эфф}}},$$

где A_i — площадь i -го контактного пятна; $A_{\text{эфф}}$ — эффективная контактная поверхность.

Из вышеизложенного видно, что приращение сопротивления электрода в сечении, сов-

падающем с контактной поверхностью, будет во столько раз больше, во сколько раз $A_{\text{электр}}$ больше $A_{\text{эфф}}$.

Таким образом, вблизи контактной поверхности как бы появляется дополнительное сопротивление, получившее название сопротивления «стягивания», которое определяет переходное сопротивление контакта.

В случае одиночного контакта переходное сопротивление равно сопротивлению стягивания и определяется в виде

$$R_{\text{пер}} = R_{\text{стяг}} = \rho E / 2a,$$

где a — радиус контактного пятна.

В случае многоточечного контакта переходное сопротивление представляет собой параллельное соединение сопротивлений стягивания каждого контактного пятна. Его можно представить как функцию контактного напряжения в виде:

$$R_{\text{пер}} = \frac{0,45 \rho E^{\frac{5}{7}} h_m^{\frac{4}{7}}}{r^{\frac{1}{7}} N^{\frac{5}{7}} n_0^{\frac{1}{4}}}$$

(для случая контактирования по линии).

Как видно из приведенных выражений, для получения наименьшего $R_{\text{пер}}$ контакта необходимо использовать материал с наименьшими удельным электрическим сопротивлением и механической твердостью, с малой шероховатостью контактных поверхностей и при этом обеспечивать наибольшее контактное давление.

Однако следует отметить, что использование контактных пар с малой шероховатостью контактных поверхностей не всегда эффективно, так как не обеспечивает хороших условий для разрушения окисных и сульфидных пленок на контактных поверхностях. Поэтому оптимальную чистоту обработки контактных поверхностей необходимо определять для каждой конструкции отдельно, учитывая механическую прочность пленок и интенсивность их роста при конкретном давлении.

Особенности работы контактов в цепях с микротоками и микронапряжениями

Основным фактором, определяющим особенности работы контактов в цепях с микротоками и микронапряжениями, является влияние на них поверхностных пленок. Необходимым условием нормальной работы контактной пары является механическое разрушение поверхностных пленок за счет контактного давления. Дополнительно разрушение поверхностных пленок происходит и за счет явления фриттинга пленок. Явление фриттинга представляет собой электрический пробой поверхностной пленки, который возникает тогда, когда величина напряженности электрического поля внутри пленки достигает порядка 10^6 В/см . Пробой может вызвать образование металлических мостиков в пленке. При напряжении в цепи выше 1 В нарушение электрического контакта за счет образования и роста пленок без влияния дру-

гих внешних факторов маловероятно, так как это напряжение достаточно для пробоя поверхностных пленок толщиной до

$$S = \frac{U_{\text{раб}}}{E_{\text{фр}}} = \frac{10}{10^6} \times 10^8 \times 100 \text{ \AA}.$$

При работе же контактов в цепях с напряжением ниже 0,05 В фриттинг практически невозможен, что резко ухудшает условия работы контактов и делает их очень чувствительными к пленкообразованию.

Поэтому контакты, предназначенные для работы в цепях с микротоками и микронапряжениями, должны иметь покрытие из инертных материалов, стойких к образованию окисных пленок (таких, как золото и др.) и обеспечивать значительные контактные давления.

Кроме наличия окисных пленок, причиной нестабильной работы контактов в цепях с микротоками и микронапряжениями могут быть также электрохимические и термоэлектрические процессы.

Два различных металла, находящиеся в контакте друг с другом, образуют электрохимический элемент.

Металл, имеющий больший электродный потенциал, становится катодом, а металл, имеющий меньший электродный потенциал, — анодом. Возникает гальванический элемент со всеми вытекающими последствиями. Эффективность действия этого элемента во многом зависит от наличия между контактами водной пленки. Чтобы исключить или максимально уменьшить влияние такого рода элемента, контактная пара должна иметь покрытие металлом, имеющим одинаковый электродный потенциал.

Наличие градиента температуры вдоль длины контакта обычно приводит к генерированию паразитных термотоков, величина которых может быть одного порядка с рабочими токами, проходящими через контактную пару. Обычно для электрических схем используются луженые медные провода, поэтому, чтобы паразитные токи были минимальными, необходимо применять соединители с контактами из материалов или материалами покрытий, которые образуют минимальную термо-ЭДС в паре с медью. Необходимо учитывать еще и такой фактор, что легирование металлов и их обработка приводят к изменению термо-ЭДС. Поэтому два одинаковых металла, имеющих различную обработку, могут в паре создавать термо-ЭДС. Например, нагартованное серебро в паре с отожженным серебром развивает термо-ЭДС до 30 мкВ/К.

Особенности работы контактов в сильноточных цепях

При прохождении электрического тока через контакт на последнем выделяется мощность, равная: $P = IR_{\text{пер}}$, которая обуславливает тепловой режим работы контактов в областях стягивания. В установившемся состоянии тепло, выделяемое в областях стягивания, компенсируется теплом, отдаваемым этими областями телу контактов. Разность между температурой

на эффективной контактной поверхности и температурой тела контакта называется температурой локального перегрева. Она равна:

$$\theta = T_0 + \sqrt{T_0^2 + \frac{U^2(\theta_1)}{4L}},$$

где T_0 — температура тела контакта, К; $L = 2,4 \times 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ — коэффициент Вейдемана-Лоренца; $U(\theta_1)$ — падение напряжения в области стягивания, В.

Вследствие малой массы металла, находящегося в областях стягивания, температура локального перегрева нарастает почти мгновенно после включения электрического тока. Время установления температуры локального нагрева обычно составляет $1-50 \times 10^{-4}$ с.

Указанное свойство контактов используется для получения контактной сварки. В электрических разъемах с этим явлением приходится бороться, то есть при расчете токовой нагрузки контактов и режимов их эксплуатации необходимо обязательно учитывать влияние переходных процессов и импульсных токовых перегрузок. При этом температура перегрева области стягивания ни в коем случае не должна превышать допустимую, которая соответствует или температуре плавления материала покрытия контактов, или температуре, при которой резко повышается химическая активность материала.

На этот момент необходимо обратить внимание при эксплуатации электрических соединителей. Ни в коем случае нельзя допускать превышения токовых нагрузок относительно ТУ без согласования отклонений с разработчиком.

Нагрев области стягивания электрического контакта вызывает изменение переходного сопротивления. Так как температура перегрева в области стягивания распределена неравномерно, то зависимость переходного сопротивления от температуры локального перегрева отличается от обычной температурной зависимости сопротивления и имеет вид:

$$R_{\text{пер}}(\theta_1) \approx R_{\text{пер}}(0)(1 + (2/3)\alpha\theta_1).$$

Тепло, отдаваемое областью стягивания электрическому контакту, вызывает нагрев последнего. Кроме того, при прохождении тока через тело электрических контактов на них выделяется определенная мощность, вызывающая их дополнительный нагрев.

Температура перегрева электрических контактов в установившемся режиме равна:

$$\theta_2 = I^2 \left(\frac{R_{\text{пер}}}{\lambda k^* D_k^2} e^{-x \sqrt{\frac{4k}{\pi \lambda D_k^2}}} + \frac{4\rho}{\pi k^* D_k^2} \right),$$

где I — ток, $R_{\text{пер}}$ — переходное сопротивление контакта, Ом; λ — теплопроводность материала контакта, Вт/см·К; k^* — коэффициент теплопередачи с поверхности в 1 см, Вт/см·К; ρ — удельное сопротивление материала контакта, Ом·см; D_k — диаметр контакта, см; x — расстояние между исследуемой точкой и местом стыка контактных электродов, см.

В точках, расположенных в непосредственной близости от места стыка электрических контактов (то есть при $x = 0$), температура контактов максимальна.

Из приведенных выражений видно, что если температура локального перегрева не зависит от геометрических размеров электрических контактов, то у температуры общего перегрева электрических контактов эта зависимость проявляется довольно-таки существенно. Поэтому уменьшение нагрева контактов можно обеспечить не только за счет уменьшения переходного сопротивления, но и за счет увеличения размеров электрических контактов.

Переходное сопротивление электрических контактов в соединителях при их многократных сочленениях

Количество контактируемых выступов определяется вероятностью встречи выступов контактирующих поверхностей при их наложении друг на друга. После каждого сочленения контактов формируется новая эффективная контактная поверхность, площадь которой $A_{\text{эфф}}$, а величина переходного сопротивления $R_{\text{пер}}$ может принимать различные значения с вероятностью, определяемой плотностью распределения количества контактируемых выступов.

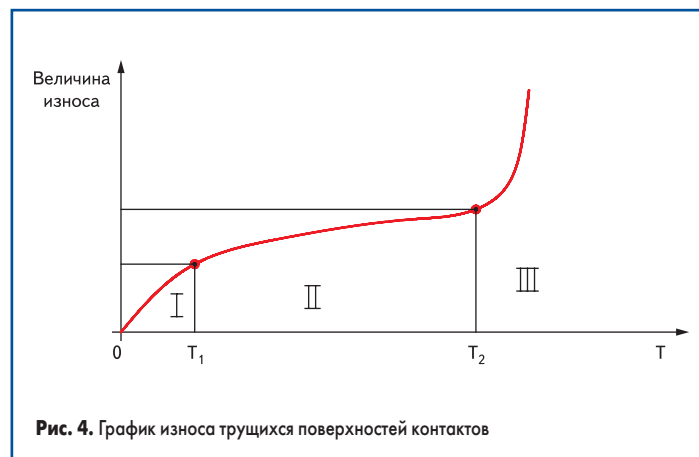
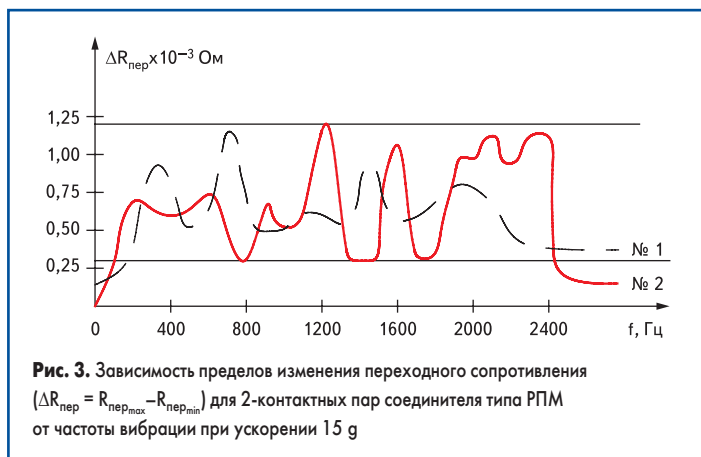
Установлено, что значения переходного сопротивления разъемных контактов, полученные после каждого их сочленения, в зависимости от величины контактного давления имеют различные законы распределения. Для давлений более 0,1 кг имеет место нормальный закон распределения, для давлений менее 0,1 кг — нормально-логарифмический.

Разброс значений переходного сопротивления, как и его средняя величина, уменьшается с увеличением контактного давления, а также с уменьшением удельного сопротивления и твердости материала контакта.

Переходное сопротивление контактов электрических разъемов при воздействии на них вибрационных нагрузок

При воздействии вибрационных нагрузок на электрические разъемы передача механических колебаний от одной детали разъема к другой происходит с существенными искажениями, что приводит к появлению механических колебаний контактов относительно друг друга.

Величина и периодичность такого рода колебаний определяется конструктивно-технологическими характеристиками электрических соединителей, такими как величина люфтов, масса деталей, жесткость крепления одной детали соединителя к другой, усилие расчленения контактов, количество контактов и т. д., а также частотой и ускорением вибрации. Кроме того, на колебания контактов относительно друг друга в контактной паре значительное влияние могут оказывать механические резонансы отдельных деталей соединителя. Колебания контактов в контактной паре вызыва-



ют изменения величины переходного сопротивления.

Характер и величина изменения переходного сопротивления очень зависят от частоты и ускорения вибрационных нагрузок (рис. 3). Зависимость величины изменения переходного сопротивления от частоты вибрации характеризуется наличием так называемых «резонансов».

Резонансные частоты, то есть частоты вибрации, при которых изменение переходного сопротивления принимает наибольшее значение, в одном и том же соединителе для разных контактных пар непостоянны, так как на них в значительной степени оказывает влияние изменение конструктивно-технологических характеристик в пределах заданных технологических допусков.

Эксплуатация электрических соединителей в режимах резонансных частот не допускается.

Изменение переходного сопротивления при воздействии вибрационных нагрузок вызывает генерацию контактами виброшумов, а пределы этих изменений характеризуют виброустойчивость конструкции.

Уменьшение изменения переходного сопротивления может быть в значительной степени достигнуто за счет увеличения усилия расчленения контактов, то есть за счет увеличения контактного давления.

Механический износ контактов при их многократном соединении и размыкании

Для защиты контактных поверхностей от пленок, особенно окисных (пленок потускнения), контакты электрических соединителей покрываются коррозионноустойчивыми металлами и их сплавами (золото, серебро, палладий, золото-никель и др.). Однако при многократном соединении и размыкании контактных пар покрытия на их поверхностях разрушаются и контактирующие поверхности лишаются защиты от пленкообразования. В современных электрических соединителях число соединений и размыканий, после которых гарантируется их нормальная работа, устанавливается порядка тысячи и более.

Процесс износа покрытий контактных пар электрических контактов является очень сложным, поэтому разработчикам, изготовителям и пользователям необходимо знать физичес-

кие процессы износа, происходящие в зоне контакта с целью определения их оптимальных конструктивных и технологических характеристик.

Износ контактов в основном обуславливается трением контактирующих поверхностей относительно друг друга в процессе соединения и размыкания соединителей. Факторы трения и причины износа различны. К ним относятся: механические, физико-химические, тепловые, электрические и др. Многообразны и виды износа.

В первом приближении весь процесс износа контактов характеризуется тремя фазами, как указано на рис. 4.

Первая фаза относится к приработке контактных поверхностей и характеризуется резким возрастанием веса материала покрытия, удаленного с трущихся поверхностей. Эту фазу принято называть фазой приработки, и обычно она составляет не более 5–10% от общего ресурса работы соединителей.

Вторая фаза — это фаза установившегося износа покрытия контактных поверхностей. Характеризуется она более равномерным износом и значительно большим ресурсом работы по сравнению с первой фазой — около 90–95% от общего ресурса работы соединителя.

Третья фаза — фаза катастрофического износа. На этой фазе дальнейшая эксплуатация соединителя становится практически невозможной.

В период приработки контактов происходит полное или частичное разрушение поверхностных неровностей, полученных при механической обработке, и образование новых неровностей. При этом изменяются форма, размеры и направленность неровностей, а также физическое состояние поверхностных слоев металла покрытия и основного металла контакта.

На форму, направленность неровностей и интенсивность износа в период приработки значительное влияние оказывает состояние поверхности покрытия и наличие адсорбированных слоев, играющих роль граничной смазки. После приработки неровности на поверхностях контактов оказываются направленными в сторону движения скольжения при трении.

Новая микрогеометрия, полученная поверхностью после приработки, если в процессе приработки соблюдались все рекомендованные режимы эксплуатации, указанные в ТУ

на электрический соединитель, является самой оптимальной для нормальной эксплуатации в течение всего срока работы соединителя. Поэтому особое внимание необходимо обращать на соблюдение всех требований и условий эксплуатации в период приработки, когда формируется основа для дальнейшей нормальной работы соединителя. Очень важным условием для обеспечения нормальной работы электрических соединителей после приработки является сохранение всех параметров неизменными в течение всего срока эксплуатации. Главным условием для перехода от фазы приработки к фазе нормальной работы, кроме вышеперечисленных условий, является удаление с трущихся поверхностей контактов продуктов износа, образовавшихся в зоне контактирования в процессе приработки.

Основной формой изнашивания в фазе нормальной работы контактов является заглаживающее изнашивание. В данном случае тонкие пленки граничной смазки из адсорбированных слоев под действием сил трения сдвигаются и увлекают с собой поверхностный слой металла покрытия. При этом отдельные неровности контактирующих поверхностей контактов закрываются. Изнашивание происходит путем сдвига, наклепа и открашивания тончайших слоев металла покрытия.

Фаза катастрофического износа наступает, когда при сдвиге адсорбированных слоев происходит слипание металлических контактируемых поверхностей и вырывание отдельных небольших фрагментов неровностей. Процесс приварки, слипания и вырыва фрагментов неровностей развивается во времени лавинообразно, что приводит к резкому увеличению процесса износа.

В процессе износа начинают участвовать не только поверхностные слои покрытия, но и основной металл, из которого изготовлены контакты. Дополнительно продукты износа, находящиеся в зоне контактирования, интенсифицируют процесс разрушения контактируемых поверхностей, переводя его в режим абразивного износа. В целях недопущения серьезных последствий эксплуатация электрических соединителей должна прекращаться до начала фазы катастрофического износа.

Для обеспечения наибольшей износоустойчивости разъемных контактов необходимо, чтобы соблюдались следующие условия:

- минимальное контактное давление;

- малые высоты выступов и волн на контактных поверхностях;
- максимальный шаг волны;
- направление следов обработки контактных поверхностей должно быть вдоль движения трения, то есть по направлению соединения и размыкания контактной пары.

Однако перечисленные требования противоречат условиям обеспечения минимальной величины переходного сопротивления, поэтому для каждой конкретной конструкции контактной пары необходимо определять свои приемлемые параметры, но в то же время рекомендации по соблюдению требований ТУ, сохранению режимов и условий эксплуатации неизменными в период приработки и дальнейшей работы, проведению регламентных работ после фазы приработки остаются обязательными для любых конструкций контактных пар. Соблюдение этих требований в значительной мере позволит обеспечить нормальное функционирование электрических соединителей.

Особенности износа контактов, размыкаемых под током

Нормальный режим работы основной массы электрических соединителей предусматривает их размыкание и соединение в обесточенном состоянии. Исключение составляют разрывные соединители и некоторые другие конструкции.

Иногда возникает необходимость размыкания электрических соединителей под током. Это крайне нежелательно, так как такой режим эксплуатации резко снижает ресурс нормальной работы соединителей.

При размыкании контактов под током происходит резкое увеличение переходного сопротивления и падения напряжения на них, что приводит в соответствии с уравнением

$$\theta = T_0 + \sqrt{T_0^2 + \frac{U^2(\theta)}{4L}}$$

к возрастанию температуры контактируемых выступов, вплоть до температуры плавления материала контакта. В первый момент размы-

кания контактов между ними образуется мостик из расплавленного металла покрытия контактов и металла самих контактов, который при дальнейшем расхождении контактов будет утончаться не в середине, а ближе к положительному электроду, где, наконец, прервется. Это явление аналогично электролизу. Этот процесс вызывает перенос металла с одного контакта на другой. Указанное явление получило название мостиковой эрозии контактов.

При напряжениях и токах в размыкаемой цепи, меньших определенных значений для конкретных материалов контактов (например, для серебра $U < 12$ В, $I < 0,4$ А), мостиковая эрозия будет являться основным видом электрического износа контактов.

В результате эрозии изменяется микрогеометрия контактных поверхностей, что приводит к повышению механического износа контактных поверхностей, так как электрическая эрозия препятствует переходу процесса износа контактов из фазы приработки в фазу нормального износа.

В том случае, когда напряжение и ток в разрываемой цепи больше определенных значений (например, для серебра $U > 12$ В, $I > 0,4$ А), между контактами при их размыкании возникает электрическая дуга. Дуга вызывает повышенную эрозию контактов — как за счет своего термического действия, так и за счет бомбардировки катода ионами газа, которые образуются в момент горения дуги. Режим работы соединителей с образованием между контактами в момент их размыкания электрической дуги является крайне нежелательным и при эксплуатации соединителей его необходимо исключать. Даже кратковременная работа соединителей в режиме образования электрической дуги практически сводит к нулю ресурс нормальной эксплуатации соединителя.

Заключение

За последние годы удалось достичь несомненного прогресса в области повышения качества и надежности работы электрических соединителей. Значительно увеличился ресурс их нормальной работы:

- количество соединений-размыканий превысило 1000;
- гамма-процентная наработка до отказа (T_γ) соединителей при $\gamma = 99\%$ в предельно допустимом режиме может превышать 20 000 часов;
- срок сохраняемости в ряде случаев превышает 25 лет.

Достигнуты условия эксплуатации соединителей в электрических цепях с достаточно низким уровнем сигнала:

- минимальный рабочий ток — 10^{-6} А;
- минимальное рабочее напряжение — 10^{-3} В.

Удалось довести максимальную температуру перегрева сильно нагруженных контактов до 30 °С.

Число контактов в одном соединителе сегодня достигает 800 единиц, с плотностью расположения до 256 контактов на 1 см² (шаг 0,625 мм).

Таких значительных показателей удалось достичь в том числе и благодаря знанию и учету физических процессов, которые протекают в контактных парах электрических соединителей.

Дальнейшее изучение и учет основных физических процессов позволит еще повысить качественные и эксплуатационные характеристики электрических соединителей.

Литература

1. Хольм Р. Электрические контакты. Издательство иностранной литературы, 1961.
2. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1967.
3. Савченко В. С. К вопросу определения норм по основным электрическим параметрам разъемных контактов. «Электрические контакты». М.: Энергия, 1964.
4. Савченко В. С. Уравнения переходного сопротивления контактов. «Электрические контакты». М.: Энергия, 1967.
5. Белоусов А. К., Савченко В. С., Якушин Ю. В. Нестабильность переходного сопротивления разъемных контактов. «Электрические контакты». М.: Энергия, 1967.
6. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио, 1972.
7. Реутт Е. К., Саксонов И. Н. Электрические контакты. Элементы теории и практики эксплуатации. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1971.
8. Мельников П. С. Технология производства электрических соединителей. М.: Энергия, 1979.
9. Сотсков Б. С. Электрические контакты. М.: Энергия, 1967.
10. Сафонов Л. И., Сафонов А. Л. Электрические прямоугольные соединители. Рекомендации по практическому применению в РЭА // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 5.