

Физические аспекты электрического соединения накруткой

Электрические соединения в радиоэлектронной аппаратуре являются наиболее ответственной частью, поскольку требуется надежное и безотказное соединение электрорадиоэлементов, ячеек, стоек, блоков, шкафов. Для разработки надежных конструкций различных типов соединений и технологий электромонтажа необходимо понимать физические процессы, происходящие при контактировании элементов РЭА. В статье описаны физические процессы, происходящие в соединении накруткой, и приведены основные составляющие алгоритма создания математической модели для исследования переходного электрического сопротивления.

Артем Ковалев

kovalevarta@gmail.com

Леонид Тищенко

leonid.tichenko@gmail.com

Накрутка — это электрическое соединение неизолированного участка провода со штыревым выводом из прочного материала, имеющим острые кромки, путем навивки провода на вывод с определенным усилием. При этом кромки штыря врезаются в провод, разрушая на нем оксидную пленку и образуя газонепроницаемое соединение. Процесс врезания штыревого вывода в провод сопровождается пластическим деформированием. При этом концентрация напряжений в зоне контакта и значительное давление обуславливают взаимную диффузию металлов, что способствует повышению надежности соединений.

Основные требования, предъявляемые ко всем электрическим соединениям, а следовательно, и к данному типу соединения, таковы: минимальное электрическое переходное сопротивление в зоне контакта, механическая прочность, близкая к прочности соединяемых материалов, стабильность электрических и механических параметров во времени при внешних воздействиях, высокая надежность и долговечность в заданных условиях эксплуатации, экономичность и производительность процесса создания, легкость и достоверность контроля качества.

Электрическое соединение, выполненное накруткой и соответствующее основным требованиям, обладает следующими свойствами:

- наименьшее электрическое переходное сопротивление по сравнению с соединениями пайкой, клеевыми и обжимом;
- высокая коррозионная стойкость благодаря наличию газонепроницаемой области контактирования;
- возможность эксплуатации в тропических условиях;
- повышенная надежность;
- простота ремонта.

В настоящее время рассматриваемый тип электрического монтажа применяется в слаботочной аппаратуре, в которой необходимо обеспечивать герметичность (газонепроницаемость) контактов для предотвращения окисления и нарушения металлической

проводимости. К примеру, электрическое соединение накруткой используется в телекоммуникационных системах для расшивки кабелей на монтажные панели и кроссировки.

Поверхности штыревого вывода и неизолированного участка провода обладают микронеровностью (шероховатостью) и наличием пленок (адгезионные газовые, окисные, сульфидные, водяные и др.), что влияет на характер процессов, протекающих в контакте.

В процессе накрутки неизолированного провода на вывод под действием давления в материале контактов всегда возникает упругая и пластическая деформация. В результате пластической деформации соприкасающихся микронеровностей и дальнейшего течения более мягкой составляющей (материала неизолированного участка провода) происходит разрушение различных тонких пленок и обнажение ювенильных поверхностей металла контакта и провода, однако активное воздействие окружающей газовой среды на материал приводит к их регенерации. Так происходит до тех пор, пока поступление молекул газа через зазоры полностью не прекратится. Далее подвод газа к ювенильным поверхностям затрудняется, и здесь возникают вакуумные условия, которые способствуют образованию металлических связей. Таким образом, первоначальное схватывание происходит на некоторых локальных участках, затем число таких участков увеличивается до образования сплошных зон соединения.

С ростом контактного давления, а следовательно, и деформации растет площадь фактического контакта металлов, что должно приводить к росту адгезионного схватывания поверхностей.

Как было сказано выше, поверхность материала никогда не бывает совершенно гладкой, и под действием давления в материале контактов возникает пластическая деформация, поэтому начальные точки соприкосновения превращаются в небольшие контактные поверхности и появляются новые контактные пятна. Сумма всех этих соприкасающихся поверхностей составляет контактную поверхность A_b (воспринимающую усилие), которая намного меньше кажущейся площади соприкосновения.

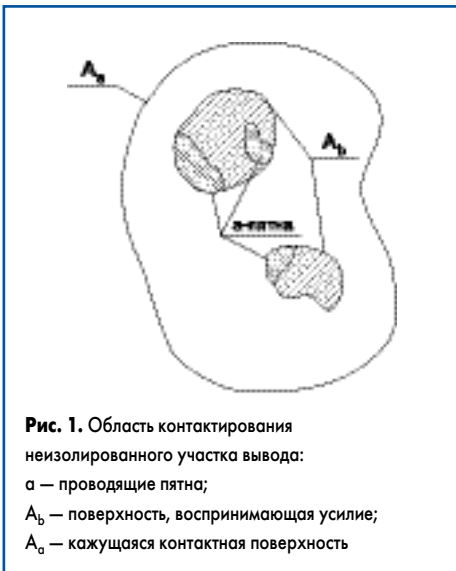


Рис. 1. Область контактирования неизолированного участка вывода:
 а — проводящие пятна;
 Ab — поверхность, воспринимающая усилие;
 Ac — кажущаяся контактная поверхность

В общем случае поверхность контакта, воспринимающая усилие (Ab), состоит из трех участков:

1. С металлическим контактом, в котором соприкасаются совершенно чистые (ювенильные) поверхности контактирующих проводников.
2. С квазиметаллическим контактом, в котором контактные элементы разделены тонкой адгезионной пленкой или тонкой (2×10^{-6} мм) пленкой потускнения.
3. С неметаллическим контактом.

Механизм прохождения электрического тока через каждый из этих участков различен. Ток через ювенильные поверхности протекает без заметного переходного сопротивления за счет наименьшего контактного сопротивления, то есть проводимость данного контакта наилучшая. Тонкие окисные пленки (до 2×10^{-6} мм) имеют хорошую проводимость за счет туннельного эффекта, однако с увеличением толщины пленки потускнения проводимость ухудшается: проводимость пленки зависит также от напряжения. Так, при определенной разности потенциалов в результате электрического пробоя пленки проводимость возрастает ввиду образования сквозных каналов и проводящих мостиков. Это явление на-

зывается фриттингом (электрический пробой, возникающий при величине электрического поля внутри пленки порядка 10^6 В/см).

На рис. 1 показаны виды контактных поверхностей. В дальнейшем проводящие контактные поверхности Ac будем называть а-пятнами. Соотношение между поверхностями различно.

Оценка площади кажущейся контактной поверхности A_a приведена в [3].

Рассмотрим алгоритм расчета переходного сопротивления ювенильных поверхностей. Под переходным электрическим сопротивлением подразумевается сопротивление стягивания R_s (сужения) линий тока к маленькому проводящему пятну контакта. Области стягивания имеются на обоих контактных элементах. В основном сопротивление стягивания локализуется в непосредственной близости к маленькому проводящему пятну.

Далее будет показано, что сопротивление стягивания можно рассчитать как функцию сопротивления контактной поверхности. Термин «контактное сопротивление» сохраняется независимо от того, является ли оно чистым сопротивлением стягивания или же имеется пленка, которая вносит на проводящей поверхности дополнительное сопротивление.

Так как контактируемые поверхности ювенильные (совершенно чистые), то выполняется следующее условие: обе поверхности — воспринимающая усилие и проводящая контактная — равны между собой, то есть $A_b = A_c$. Другими словами, измеренное контактное сопротивление равно сопротивлению стягивания, которое подсчитывается по поверхности A_b .

Предполагается, что удельное сопротивление является величиной постоянной и отсутствует термо-ЭДС.

Обозначим поверхность контактирования неизолированного участка провода как A_1 , а участок контактирования вывода — A_2 (рис. 2).

Определим величину переходного сопротивления между A_2 и A_1 . Для этой цели необходимо математическое выражение для тока, текущего в пространстве между A_2 и A_1 . Пусть A_2 считается источником тока, а A_1 — стоком.



Рис. 2. Фрагмент части контакта

Пространство между этими поверхностями принимают свободным от источников и стоков. В этом случае вектор тока может быть представлен как градиент потенциальной функции ϕ , которая в рассматриваемой области удовлетворяет условию Лапласа:

$$\Delta \phi = 0.$$

Задача состоит в нахождении таких решений этого уравнения, которые удовлетворяли бы определенным граничным условиям [1].

На рис. 2 представлена часть одного контакта, ограниченная поверхностями A_2 и A_1 , а также наружной поверхностью M . Поверхность M должна удовлетворять условию: $(d\phi/dn)_M = 0$, где n — нормаль к поверхности M .

Выражение для расчета поверхностного заряда на A_2 в единицах СГС:

$$Q = \frac{1}{4\pi} \int_{A_2} \left| \frac{\partial \phi}{\partial n} \right| dA_2.$$

На поверхности A_1 сосредоточен такой же по величине заряд, но противоположный по знаку.

Для взаимосвязи поверхностного заряда и разности потенциалов введем емкость:

$$C = Q/|\phi_2 - \phi_1|.$$

Формула для расчета тока, протекающего по контактным поверхностям:

$$I = \frac{1}{\rho} \int_{A_2} \left| \frac{\partial \phi}{\partial n} \right| dA_2,$$

где ρ — усредненная величина удельного сопротивления материала контактов.



Рис. 3. Изображение вывода в оптическом микроскопе (увеличение в 100 раз)

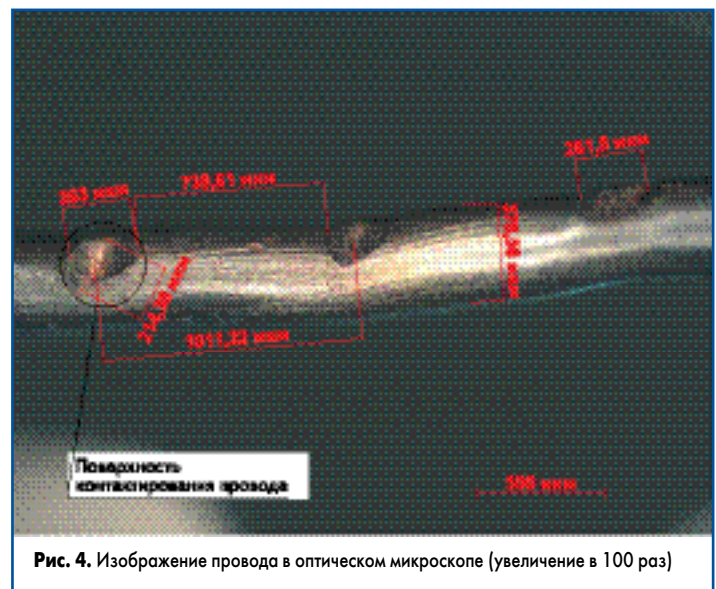


Рис. 4. Изображение провода в оптическом микроскопе (увеличение в 100 раз)

Мы получили выражение для расчета сопротивления стягивания:

$$R_{21} = |\varphi_2 - \varphi_1| / I = \rho / 4\pi C.$$

Рассмотрим изображения образцов накрутки, полученные на оптическом микроскопе.

Поверхность контактирования вывода с проводом является плоскостью, образовавшейся в результате деформации вывода (рис. 3).

Поверхностью контактирования провода с выводом является эллиптическая поверхность (рис. 4).

Представим область стягивания как эллиптическое контактное пятно на плоской поверхности полубесконечного тела.

Выражение для поверхностей внутри контактирующих элементов (эллипсоиды):

$$\frac{x^2}{a^2 + \mu} + \frac{y^2}{\beta^2 + \mu} + \frac{z^2}{\mu} = 1,$$

где μ — определенный параметр; $\sqrt{\mu}$ — высота полуэллипсоида; $\sqrt{a^2 + \mu}$ — ось, в направлении оси x .

Пространство между поверхностями вывода и контакта свободно от источников и стоков.

Учитывая параметр μ , найдем сопротивление стягивания R_{21} по выше рассмотренному алгоритму.

Емкость между плоской эллиптической базовой поверхностью A_2 и полуэллипсоидом:

$$C' = \left[\int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{d\mu}{\sqrt{(a^2 + \mu) \times (\beta^2 + \mu) \times \mu}} \right]^{-1}.$$

Следовательно, с учетом выражения для определения R_{21} получим искомую величину сопротивления:

$$R_{21} = R_{\mu} = \frac{\rho}{4\pi} \int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{d\mu}{\sqrt{(a^2 + \mu) \times (\beta^2 + \mu) \times \mu}}.$$

Плотность тока на границе:

$$j_{Ac} = \frac{1}{2\pi a\beta} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{\beta^2} \right)}}.$$

Если предположить, что $a = \beta$, то есть A_1 — круглая сферическая поверхность, то выражение для расчета сопротивления стягивания примет вид:

$$R_{\mu} = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{d\mu}{(a^2 + \mu)\sqrt{\mu}} = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{dz}{a^2 + z^2} = \frac{\rho}{2\pi a} \times \text{arctg} \frac{\sqrt{\mu}}{a}.$$

При длинной области стягивания, то есть при $\mu = \infty$, получаем выражение для одного контактного элемента (вывода или провода):

$$R' = \rho / 4a.$$

Для всей области стягивания, расположенной в обоих контактных элементах (вывода и провода):

$$R'' = \rho / 2a.$$

Итак, получив переходное сопротивление одного участка контакта (R''), можно определить полное сопротивление одного витка накрутки. Зная величину полного сопротивления и учитывая релаксацию соединения, можно для разных типов контактируемых материалов подобрать оптимальное число витков накрутки.

Таким образом, обеспечивается требуемое значение переходного электрического сопротивления при оптимальном количестве витков.

Подбор оптимального числа витков накрутки будет показан в следующей работе. ■

Литература

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
2. Рощин Г. И. Несущие конструкции, механизмы и механические узлы ЭВА / Учеб. пособие для вузов. М.: Советское радио, 1980.
3. Ковалев В. Г., Ковалев С. В., Коновалов В. А. Основные расчетные параметры электро монтажа методом накрутки // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 8.
4. Давиденко А. А., Бейгельзимер Я. Е. Анализ образования связей между составляющими биметалла в процессе пластической деформации — http://www.masters.donntu.edu.ua/2004/fizmet/manzhura/rus_pages/pub_3.htm