

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РЕЛЕ

В.И.Дятлов, Т.В.Полиня, Б.С.Потапов, А.Н.Роголев

В настоящей работе проводится выделение основных параметров ПЭР и намечаются подходы к взаимосвязанному их рассмотрению. В качестве прототипа используются параметры электромагнитных реле. Наряду с основными параметрами ПЭР рассматривается ряд специфических дополнительных величин и факторов, определяющих особенности его работы.

Контактное сопротивление. С точки зрения схемотехники в это понятие входит сопротивление подводных контактных полюсов и собственно контактное сопротивление замкнутых контактов. Соотношения между этими составляющими контактного сопротивления рассматриваются в [1] для конкретной конструкции ПЭР с контактной системой из бериллиевой бронзы БрБ2. Для некоторых металлических пленок в работе [2] приведены зависимости контактного сопротивления от контактного наката.

Ориентировочно величина контактного сопротивления  $R_k$  между чисто металлическими пленочными контактами ПЭР может быть определена по формулам [3]:

$$R_k = \rho / 2a \quad (1)$$

где для случая упругой деформации:  $a = 1,11 \sqrt[3]{\frac{F_k \cdot Z}{E}}$

а для пластической деформации:  $a = \sqrt{\frac{F_k}{k \cdot H_b}}$

$\rho$  — удельное электрическое сопротивление,  $a$  — радиус пятна стягивания,  $E$  — модуль Юнга,  $F_k$  — сила прижатия контактов,  $Z$  — радиус неровности (шероховатости) контактной поверхности,  $H_b$  — твердость материала по Бринеллю,  $k$  — коэффициент, характеризующий шероховатость контакта ( $0,1 < 0,3 < k < 1$ ). Отме-

тим, что формула (1) верна для длинного стягивания и пригодна для оценки сопротивления стягивания при определенных размерных соотношениях контактов ПЭР и определенных контактных давлениях.

Наиболее вероятные верхние значения радиусов неровностей лежат в диапазоне  $500 \text{ \AA} < Z < 2000 \text{ \AA}$  [4], т.к. применяемые в ПЭР тонкие пленки конденсируются в вакууме на полированные подложки и повторяют их рельеф.

Реально контактные поверхности покрыты пассивирующими или адгезионными пленками. При малых контактных усилиях, характерных для ПЭР [5], они могут сохраниться неповрежденными и внести дополнительное сопротивление  $R_{пк} = \frac{\sigma}{4 \cdot a^2}$ , где  $\sigma$  - сопротивление пленки, отнесенное к единице поверхности. Поверхностные пленки, увеличивая контактное сопротивление до

$$R_k = \rho/2a + \frac{\sigma}{4 \cdot a^2} \quad (2)$$

способствуют свариванию контактов при протекании тока вследствие более эффективного разогрева контактной поверхности и определяют вероятную величину мостикового переноса (за счет эффекта Колера). Кроме того, окисные поверхностные пленки стабилизируют образовавшийся мостик [6]. Проведенные оценочные расчеты показали, что основной вклад в контактное сопротивление вносит второй член правой части формулы (2), а сама величина  $R_k$  довольно хорошо совпадает с определенной экспериментально [1,2].

Итак, получение малого контактного сопротивления в первую очередь связано с обеспечением определенного контактного усилия  $F_k$  и применением технологии производства, обеспечивающей минимальную шероховатость и чисто металлическую проводимость пленок.

Коммутируемый ток. Зная полное контактное сопротивление, можно оценить допустимые величины тока ( $I_{\max}$ ) через контакты ПЭР, потребовав отсутствия заваривания при неподвижном состоянии контактов. Тогда  $I_{\max} = \frac{U_k}{R_k}$ , где  $U_k$  - критическое падение напряжения, приводящее к свариванию контактов, а

$R_k$  в общем случае определяется по формуле (2). Относительно значений  $U_k$  у разных авторов существуют противоречивые мнения. Экспериментально прилипание контактов [3,6] наблюдается при контактном напряжении меньшем, чем напряжение плавления

( $U_n$ ) и даже напряжение размягчения ( $U_r$ ) контактного металла. Для оценки будем считать  $U_n = U_r$ .

Допустимое значение коммутируемого тока может быть также оценено с позиций получения наименьшего мостикового переноса по формуле [3]:

$$I \cdot x \cdot a^2 = \frac{q \rho}{4} I^2$$

Здесь  $\rho_n$  - удельное электрическое сопротивление расплавленного металла (обычно  $\rho_n = 3 \cdot 10 \rho$ ),  $U_n$  - напряжение образца мостика,  $x$  - расстояние от контактной поверхности, определяющее наиболее перегретую часть мостика стягивания.

Из приведенной формулы очевидно, что допустимая величина коммутируемого тока пропорциональна кубическому или квадратичному корню из контактного давления. Оценочные расчеты показали, что только для контактной пары золото-золото допустимый ток через мостик может достигать 50 ма. Для других контактных пар  $I_{\max} \ll 10 - 15$  ма. Поскольку с увеличением тока для плавочных контактов, также как и в случае обычных контактов, наблюдается увеличение длины мостиков размягчения [7], то малый ток контактов ПЭР может являться сдерживающим фактором.

Время замыкания и размыкания. По сравнению с электромагнитным реле эти параметры в ПЭР определяются двумя факторами. Замыкание и размыкание электростатического удерживающего привода во времени определяется практически деформацией подвижной системы [8] и временем вытягивания мостиков размыкания [7]. Известно [3,5], что увеличение скорости замыкания и размыкания благоприятствует уменьшению времени контактов. Однородность контактов и приваривание также уменьшается с увеличением скорости замыкания. Поэтому при конструировании ПЭР необходимо стремиться к обеспечению возможных значений скорости движения мембраны при одновременном исключении дребезга мембраны. Некоторые экспериментальные данные по этому вопросу отражены в [9,10].

Напряжение срабатывания и отключения. Эти параметры ПЭР и взаимосвязь их с некоторыми конструктивными размерами реле охарактеризованы в работах [5,8,11,12]. Здесь отметим, что при конструировании ПЭР обязательно должно учитываться электростатическое притяжение подвижного контакта неподвижным, т.е. при заданной величине напряжения срабатывания это накладывает определенное

ограничения на размеры конструкции ПЭР. Некоторые конструктивные пути улучшения параметров ПЭР указаны в работе [13].

**Коммутируемое напряжение.** При раздвижении контактов мембрана преодолевает сопротивление вытягиваемого мостика размыкания и силу электростатического притяжения между размыкающимися контактами. (Экспериментальное определение сил размыкания контактов рассмотрено на стр.26). В зависимости от величины коммутируемых напряжения и тока, характера нагрузки, а также скорости раздвижения контактов обесточивание контактной цепи (появление на контактах всего коммутируемого напряжения) будет происходить на различном удалении от поверхности неподвижного контакта. Вполне может оказаться, что это расстояние таково, что силы электростатического притяжения превысят упругую силу мембраны ПЭР и произойдет вторичное замыкание контактов.

Для описания процессов размыкания ПЭР вводится понятие эффективного расстояния  $\delta$ ,  $\delta = S_m + V_p \cdot T$ , где  $S_m$  - длина мостика размыкания,  $V_p$  - средняя скорость мембраны при вытягивании мостика,  $T$  - время существования импульсного разряда, позволяющее совместно с рассмотрением кривых статического равновесия мембраны [7,13] определить значение коммутируемого напряжения.

**Износостойкость.** Будем понимать под этим термином число срабатываний ПЭР, при котором основные параметры не выходят за оговоренные границы допусков. Очевидно, что и в случае ПЭР износ контактов ( $G$ ) будет пропорционален протекшему количеству электричества ( $Q$ ), т.е.  $G = \gamma \cdot Q$  и поэтому грубую оценку износостойкости ПЭР можно получить, используя известные данные [3] по коэффициентам мостикового переноса и переноса материала искровым разрядом (или короткой дугой). Отметим, что определение числа возможных срабатываний, например, при заранее оговоренном уменьшении (за счет эрозии) высоты контактов, должно проводиться с учетом того, что контакты из-за неплоскостности своей поверхности могут соприкасаться на площади меньшей, чем номинальная. Кроме того, должен быть обязательно учтен характер нагрузки.

**Коэффициент усиления ПЭР по напряжению.** В связи с вышеизложенным важным, как бы суммирующим многие свойства ПЭР, параметром, является коэффициент усиления, который определяется

отношением коммутируемого напряжения к напряжению срабатывания  $U_{ср}$  при заданных значениях коммутируемого тока  $I_k$ , характера нагрузки, надежности  $P$  и гарантированной износостойкости  $N$  контактов:

$$K = \frac{U_k}{U_{ср}} \Big|_{\substack{I_k = \text{const} \\ P = \text{const} \\ N = \text{const}}} \Big|_{U_k=0}$$

#### Л и т е р а т у р а

1. ЛИТАЕВА Э.А., НУДЕЛЬМАН А.М., РОГАЛЕВ А.И. Сопротивление контактной цепи пленочных электростатических реле на постоянном токе. Настоящий сборник.
2. КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Переходное сопротивление пленочных контактов при малых контактных усилиях. Настоящий сборник.
3. ХОЛЫМ Р. Электрические контакты, ИЛ, 1961.
4. ГРАНКИН А.И., ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.Ю. Зависимость механических свойств конденсаторов меди от дефектов поверхности. В сб.: Материалы ко II Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Новосибирск, 1969.
5. ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С. Статические характеристики ПЭР с выступающим контактом. Настоящий сборник.
6. РАХОВСКИЙ В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М., 1970.
7. КОПЫТКОВ Н.Ф., ПОТАПОВ Б.С. Осциллографическое исследование процессов размыкания пленочных контактов. Настоящий сборник.
8. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С. В сб.: Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Вып.5. Новосибирск, 1968, с.159.
9. ИГНАТЕНКО П.С., СОЛДАТЕНКОВ И.С. В сб.: Материалы ко II Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Новосибирск, 1970, с.60.
10. ИГНАТЕНКО П.С., СОЛДАТЕНКОВ И.С. В сб.: Материалы ко II Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Новосибирск, 1970, с.64.
11. ДЯТЛОВ В.Л., ПЬЯНКОВ Ю.А. Исследование влияния формы зазора на основные характеристики пленочных электростатических реле. Настоящий сборник.
12. ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С., РОГАЛЕВ А.И., СТЕРЕЛЮХИН В.А. Упрощенные формулы для расчета пленочных электростатических реле на заданные параметры. Настоящий сборник.
13. КОНЯШКИН В.В., ПОЛИНА Т.В., СОХИН А.А., СТЕРЕЛЮХИН В.А. Конструктивные пути улучшения характеристик пленочных электростатических реле. Настоящий сборник.