

УДК 621.38.001(031)

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, С. В. МЕРЛЯН

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: aiefimen@gmail.com, stasmerlyan@gmail.com

## ПЕРЕХОДНОЕ КОНТАКТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ С ПЛОСКИМИ КОНТАКТАМИ

*На основании экспериментальных исследований получены зависимости, позволяющие по заданному значению переходного контактного сопротивления  $R_{пер}$  оперативно, при небольшом объеме вычислений найти оптимальное давление упругих элементов плоских контактов с различными покрытиями (олово-висмут, никель, палладий, серебро, золото). Кроме этого, полученные результаты оценки величины и стабильности  $R_{пер}$  позволяют выбрать оптимальное покрытие в зависимости от условий работы контактов.*

*Ключевые слова: переходное контактное сопротивление, контактное давление, плоский контакт, материал покрытия контакта.*

Электрические контактные соединения в большом количестве входят во все электронные модули и аппараты и являются очень ответственными элементами. От состояния электрических контактов в наибольшей степени зависит безотказная работа электронной аппаратуры. Для создания оптимальных конструкций электрических соединений и их правильного использования нужно знать характеристики контактных соединений, в первую очередь переходное контактное сопротивление, и их зависимость от различных факторов. Особенно это актуально для разъемных контактов, когда вступает в силу противоречие между значениями переходного контактного сопротивления и усилия сочленения-расчленения [1, 2].

По роду соприкасающихся поверхностей различают плоские, линейные и точечные контакты, причем плоские наименее изучены с точки зрения определения переходного контактного сопротивления. Плоские контакты, образующиеся при соприкосновении плоских поверхностей, могут использоваться как в электрических соединителях, так и при создании контактных непаяных соединений при поверхностном монтаже электронных компонентов на печатные платы [3].

Анализ плоских контактов показывает, что действительная (эффективная) площадь соприкосновения плоских контактов меньше, чем общая площадь их поверхности (кажущаяся площадь контактирования) [2]. Объясняется это тем, что на поверхности даже хорошо обработанных и пригнанных друг к другу контактных поверхностей остаются микроскопические неровности и при отсутствии силы прижатия контактирование происходит лишь в небольшом количестве точек. При сжатии контактов верши-

ны неровностей, по которым они соприкасаются, сминаются, образуя небольшие площадки касания контактов. Увеличение сжимающей силы приводит к еще большему смятию неровностей, сближению контактов и возникновению новых дополнительных площадок касания [2]. Таким образом, действительная площадь соприкосновения контактов, равная сумме элементарных площадок касания, меньше полной контактной поверхности и зависит от контактного давления, шероховатости, неплоскостности и вида покрытия контактирующих поверхностей.

В случае малой площади соприкосновения контакт может иметь значительное сопротивление для прохождения тока, что в свою очередь может приводить к его перегреву, потерям в нем мощности и затуханию сигналов. Поэтому определение переходного контактного сопротивления  $R_{пер}$  является весьма важным этапом проектирования контактных соединений. Однако процесс этот представляет собой сложный расчет и требует к тому же проведения испытаний в каждом конкретном случае, поскольку  $R_{пер}$  зависит от коэффициента, характеризующего относительную деформацию микронеровностей при усилии, необходимом для механического удаления пленки, которая покрывает контакты. Прямые измерения этого коэффициента очень сложны, поэтому большее применение находят косвенные экспериментальные оценки. Все это делает процесс определения переходного контактного сопротивления труднореализуемым в инженерной практике. К тому же вызывает сомнение возможность получения приемлемых показателей точности [2].

Альтернативой расчетно-экспериментальному методу определения переходного сопротивления

могут быть его измерения в условиях, приближенных к реальным на макетных стендах, и распространение результатов измерений после соответствующей обработки на другие условия (размеры, контактное давление).

Целью настоящей работы является получение пригодных для применения в инженерных расчетах зависимостей переходного контактного сопротивления от контактного давления для плоских контактов с различными покрытиями (олово-висмут, никель, палладий, серебро, золото), предназначенных для использования в электрических соединителях для поверхностного непаяного монтажа [3] и в других конструкциях контактных соединений, использующих плоские контакты и прижим контактирующих поверхностей.

### Экспериментальное исследование

В рассматриваемом контактном соединении одна печатная плата (ПП) жесткая, другая выполнена на гибком основании — гибкая печатная плата. Такая конструкция позволяет при использовании прокладки из эластомерного материала, располагаемой над гибкой ПП, избежать негативного влияния неплоскостности контактирующих поверхностей и таким образом повышать эффективную площадь контактирования [3]. Материал покрытий на обеих контакти-

рующих поверхностях одинаков. В качестве плоских контактов использована фольга печатных плат, чистота поверхности которой определяет чистоту поверхности образцов.

Измерение переходного контактного сопротивления проводилось на специальном приспособлении, конструкция которого показана на рис. 1.

Упрощенная схема контактирования показана на рис. 2. Контакт создается между контактными площадками 2 и 4 на жесткой 1 и гибкой 3 печатных платах. Усилие прижима прикладывается к гибкой ПП через прокладку 5, изготовленную из эластомерного материала, и жесткую пластину 6. Для определения давления с известной точностью используются грузы с нормированными значениями массы.

Для исследования переходного контактного сопротивления была проведена серия испытаний для каждого из изучаемых покрытий и получены данные при различных значениях давления. При этом для одного значения давления измерение  $R_{пер}$  выполнялось не менее пяти раз (каждое измерение проводилось после снятия и установления нагрузки). Результаты измерений были усреднены и приведены к удельным величинам  $R_{пер,уд}$  и  $P_{уд}$ .

Как видно из представленных на рис. 3 графиков, сопротивление контактов, покрытых никелем, сплавом олово-висмут и палладием, сни-

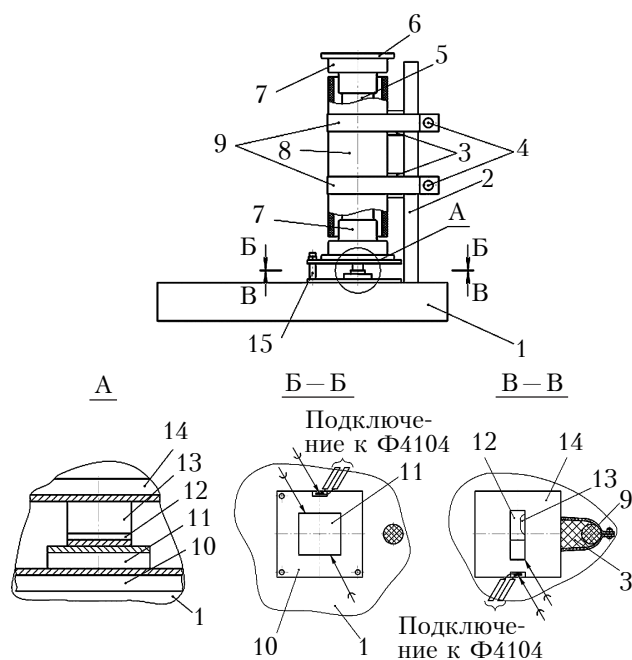


Рис. 1. Испытательная установка: 1 — основание; 2 — штатив; 3 — упор; 4 — винтовой зажим; 5 — внутренняя труба; 6 — подставка для грузов; 7 — пустотельные насадки; 8 — внешняя труба; 9 — хомут; 10 — нижняя, неподвижная ПП со слоем фольги; 11 — жесткая ПП с испытуемым покрытием; 12 — гибкая ПП с испытуемым покрытием; 13 — эластомерная прокладка; 14 — верхняя, подвижная ПП со слоем фольги; 15 — фиксатор положения ПП 10 и 14 в горизонтальной плоскости; Ф4104 — микроамметр

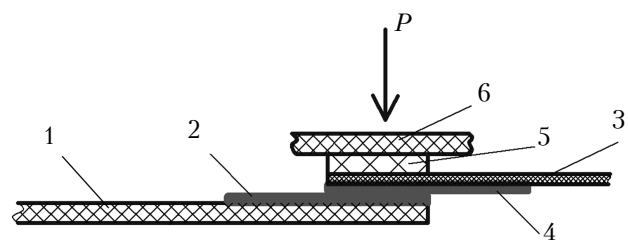


Рис. 2. Схема контактирования: 1 — жесткая ПП с контактом 2; 3 — гибкая ПП с контактом 4; 5 — эластомерная прокладка; 6 — жесткая пластина

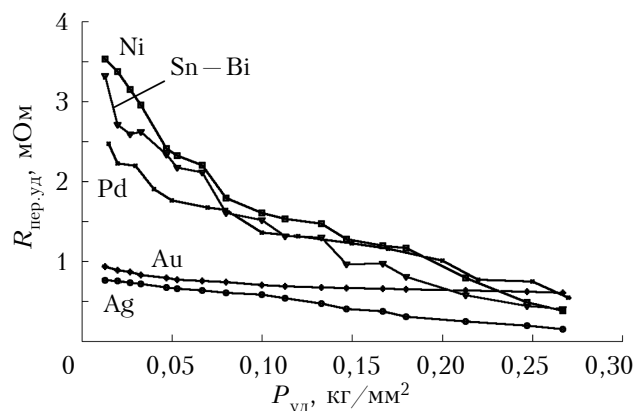


Рис. 3. Типичные зависимости переходного контактного сопротивления от давления для различных покрытий

жается достаточно резко вначале, что объясняется быстрым ростом числа точек и площадок контактирования при увеличении усилия прижатия в области малых давлений. При дальнейшем повышении  $P_{уд}$  сопротивление уменьшается медленнее, поскольку снижается интенсивность деформации неровностей материала, и начиная с некоторого значения  $P_{уд}$  величина  $R_{пер.уд}$  остается практически неизменной либо уменьшается очень незначительно. В случаях же когда покрытие выполнено из серебра или золота переходное контактное сопротивление мало зависит от давления, поскольку уже при малых усилиях сжатия такие поверхности имеют значительную эффективную площадь контактирования.

Таким образом, очень важно правильно выбрать контактное давление, чтобы установить оптимальное соотношение между переходным сопротивлением и контактным давлением: с одной стороны, давление в контакте должно быть достаточным для того, чтобы обеспечить малое переходное сопротивление, с другой — оно не должно вызывать в металле контактов пластических деформаций, способных привести к их разрушению.

### Обработка экспериментальных результатов

Для удобства использования полученных экспериментальных данных при создании конструкций контактных соединений найдем такие аналитические зависимости, которые с наибольшим приближением описывали бы зависимости переходного контактного сопротивления от контактного давления не только в диапазоне измерений, но и за его пределами.

На основании измеренных зависимостей  $R_{пер.уд}$  от  $P_{уд}$  для каждого из покрытий с помощью программы MATLAB были получены наборы формул (более сорока), каждая из которых может быть использована для вычисления переходного контактного сопротивления с различной степенью приближения к экспериментальным значениям. Из них необходимо выбрать те, что позволяют получить наиболее точный результат.

Для оценки отклонения значений параметров, вычисленных по эмпирическим формулам, от экспериментальных данных используют различные методы, например метод наименьших квадратов, метод средних, приближение в отдельных точках и т. д. [4]. Все они позволяют подобрать эмпирические формулы так, чтобы получить удовлетворительное приближение определяемого параметра к его истинному значению. В данной работе был использован метод средних.

С целью уменьшения количества расчетов из набора формул для каждого покрытия были отобраны три-четыре зависимости, графики которых визуально наиболее приближены к экспериментальным точкам. Выбранные зависимости были обработаны, и результаты вычисления от-

клонений для каждого покрытия сведены в таблицы, имеющие следующий вид:

Экспериментальное значение $R(P_{уд i})$	Результаты вычислений по формулам:			
	1	...	n	
$R^{(1)}(P_{уд i})$	$\varepsilon_i^{(1)} = R^{(1)}(P_{уд i}) - R(P_{уд i})$	...	$R^{(n)}(P_{уд i})$	$\varepsilon_i^{(n)} = R^{(n)}(P_{уд i}) - R(P_{уд i})$
$R(P_{уд 1})$	$\varepsilon_1^{(1)} = R^{(1)}(P_{уд 1}) - R(P_{уд 1})$	...	$R^{(n)}(P_{уд 1})$	$\varepsilon_1^{(n)} = R^{(n)}(P_{уд 1}) - R(P_{уд 1})$
...	...	...	...	...
$R(P_{уд k})$	$\varepsilon_k^{(1)} = R^{(1)}(P_{уд k}) - R(P_{уд k})$	...	$R^{(n)}(P_{уд k})$	$\varepsilon_k^{(n)} = R^{(n)}(P_{уд k}) - R(P_{уд k})$
	$\sum_{i=1}^k \varepsilon_i^{(1)}$	...		$\sum_{i=1}^k \varepsilon_i^{(n)}$

Здесь приняты следующие обозначения:

$R(P_{уд i})$  — экспериментальное значение удельного переходного контактного сопротивления при  $i$ -м удельном давлении;

$k$  — количество экспериментальных значений давления, при которых проводились измерения  $R(P_{уд i})$ ;

$n$  — количество формул для расчета, отобранных из первичного множества;

$R^{(n)}(P_{уд i})$  — удельное переходное сопротивление, вычисленное по  $n$ -й формуле для  $i$ -го удельного давления;

$\varepsilon_i^{(n)}$  — отклонение расчетной величины от экспериментальной.

На основании табличных данных из набора эмпирических формул для каждого покрытия была выбрана та, которая дает минимальное суммарное отклонение. В результате были получены следующие аналитические зависимости удельного переходного контактного сопротивления от удельного давления:

— для контактов, покрытых никелем

$$R_{Ni} = \frac{4 \cdot 10 P_{уд}^{-4}}{P_{уд}^4 - 0,37 P_{уд}^3 + 0,04 P_{уд}^2 - 2 \cdot 10^{-4} P_{уд} + 10^{-4}}; \quad (1)$$

— для контактов, покрытых серебром

$$R_{Ag} = \frac{4 \cdot 10^{-3} P_{уд} + 10^{-3}}{P_{уд}^3 - 0,13 P_{уд}^2 + 0,02 P_{уд} + 2 \cdot 10^{-3}}; \quad (2)$$

— для контактов, покрытых золотом:

$$R_{Au} = 1,037 \cdot P_{уд}^{-0,08} - 0,55; \quad (3)$$

— для контактов, покрытых сплавом олово-висмут

$$R_{Sn-Bi} = 3,29 \cdot \exp(-7,83 P_{уд}) + 0,96 \cdot \exp(-152 P_{уд}); \quad (4)$$

— для контактов, покрытых палладием

$$R_{Pd} = \frac{0,09P_{уд}^2 - 0,05P_{уд} + 0,01}{P_{уд}^3 - 0,35P_{уд}^2 + 0,04P_{уд} + 4 \cdot 10^{-3}}; \quad (5)$$

Расчитанное по этим формулам значение удельного переходного контактного сопротивления имеет размерность мОм при задании давления  $P_{уд}$  в кг/мм<sup>2</sup>.

Графики зависимости переходного контактного сопротивления от давления, полученные по формулам (1)–(5) для различных покрытий, приведены на рис. 4.

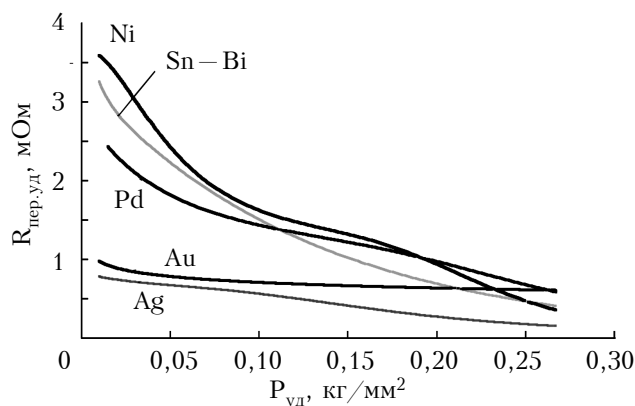


Рис. 4. Расчетные зависимости переходного контактного сопротивления от давления для различных покрытий

При создании конструкции контактного соединения важное значение имеет выбор покрытия, которое характеризует, с одной стороны, качество контакта, а с другой — его экономические показатели, и зачастую эти характеристики находятся в противоречии. Зависимости, приведенные на рис. 4, позволяют по заданному значению переходного сопротивления определить не только давление, создаваемое упругими элементами контакта, но и выбрать покрытие исходя из определенных условий.

При оценке качества различных покрытий следует учитывать также стабильность переходного контактного сопротивления не только во времени, но и в условиях сочленений-расчленений элементов контакта.

Как отмечалось ранее, при экспериментальном исследовании для каждого  $P_{уд}$  проводилась серия измерений переходного контактного сопротивления. Расчет среднеквадратических отклонений измеренных величин для каждого значения давления проводился по формуле [5, с. 93]

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}, \quad (6)$$

где дисперсия рассчитывается по формуле

$$D[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i. \quad (7)$$

Здесь  $x_i$  — возможные значения случайной величины  $X$  (в данном случае  $R_{пер}$ ) с вероятностью  $p_i$ . Считаем события равновероятными, т. е.  $p_1 = p_2 = \dots = p_n$ , и тогда  $p_i = 1/n$ , поскольку

$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ . Математическое ожидание (обозначено через  $m_x$  вместо  $M[X]$  для удобства записи [5]) вычислялось по формуле

$$m_x \equiv M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i.$$

Результаты исследования среднеквадратического отклонения значений  $R_{пер}$  приведены на рис. 5.

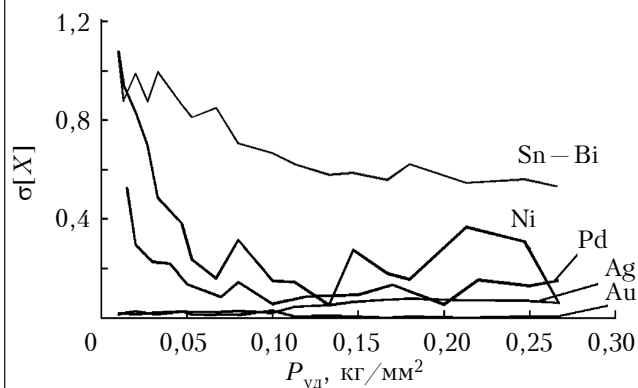


Рис. 5. Зависимость среднеквадратического отклонения значений  $R_{пер.уд}$  от давления для различных покрытий

Результаты исследования показали, что, как и ожидалось, наиболее стабильными из пяти исследованных контактных покрытий являются золото и серебро — для них среднеквадратическое отклонение значений  $R_{пер.уд}$  и колебания его величины при изменении  $P_{уд}$  наименьшие. Для палладия имеются заметные колебания  $\sigma[X]$ , но их значения относительно небольшие. Наибольшей нестабильностью характеризуются контакты с покрытием олово-висмут, а также с никелевым покрытием при небольших удельных давлениях.

### Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований получены зависимости, позволяющие по заданному значению переходного контактного сопротивления  $R_{пер}$  оперативно, при небольшом объеме вычислений найти оптимальную величину контактного давления упругих элементов плоских контактов с различными покрытиями. Кроме этого, полученные результаты оценки величины и стабильности  $R_{пер}$  позволяют выбрать оптимальное покрытие в зависимости от условий работы контактов, в том числе при различных значениях тока и напряжения передаваемых сигналов и в силовых цепях.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лярский В. Ф., Мурадян О. Б. Электрические соединители: Справочник. — Москва: Радио и связь, 1988. [Lyarskii V. F., Muradyan O. B. Elektricheskie soediteli: Spravochnik. — Moscow: Radio i svyaz', 1988]
2. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъёмные контакты в радиоэлектронной аппаратуре



ре. — Москва: Энергия, 1975. [Belousov A. K., Savchenko V.S. Elektricheskie raz'emnye kontakty v radioelektronnoi apparature. — Moscow: Energiya, 1975]

3. Ефименко А. А. Электрические соединители для поверхностного непаяного монтажа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 9–15. [Efimenko A. A. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2012. N 4. P. 9]

4. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. — Киев: Выща шк., 1991. [Frolov V. A. Analiz i optimizatsiya v prikladnykh zadachakh konstruirovaniya RES. — Kiev: Vyshcha shk., 1991]

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — Москва: Гос. издательство физико-математической литературы, 1958. [Venttsel' E. S. Teoriya veroyatnostei. — Moscow: Gos. izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1958]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 26.06 2013 г.*

Efimenko A. A., Merlyan S. V. **Transient contact resistance in electrical connections with flat pins.**

*Keywords: transient contact resistance, contact pressure, flat contact, contact coating material.*

On the basis of experimental research, the authors have obtained dependences allowing to find promptly and with a small amount of calculations the optimum pressure value for elastic elements of flat contacts with

different coatings (tin-bismuth, nickel, palladium, silver, gold), using the preset value of contact resistance  $R_{пер}$ . Moreover, the obtained results of estimation of quantity and stability of  $R_{пер}$  allow to choose the optimal coating according to the operating conditions of the contacts.

Ukraine. Odessa National Polytechnic University.

Єфіменко А. А., Мерлян С. В. **Перехідний контактний опір у електричних з'єднаннях з плоскими контактами.**

*Ключові слова: перехідний контактний опір, контактний тиск, плоский контакт, матеріал покриття контакту.*

На підставі експериментальних досліджень отримано залежності, що дозволяють по заданому значенню перехідного контактного опору  $R_{пер}$  оперативно, при невеликому обсязі обчислень знайти оптимальну величину тиску пружних елементів плоских контактів з різним покриттям (олово-вісмут, нікель, паладій, срібло, золото). Крім цього, отримані результати оцінки величини і стабільності  $R_{пер}$  дозволяють вибрати оптимальне покриття залежно від умов роботи контактів.

Україна, Одеський національний політехнічний університет.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А. Проектирование межблочных электрических соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях.— Одесса: Политехпериодика, 2013.

В монографии рассматриваются вопросы проектирования межблочных электрических соединений в электронной аппаратуре, создаваемой с использованием базовых несущих конструкций (БНК). Приводится классификация и характеристика современных типов электрических соединений и БНК, формализованы задачи их проектирования. Большое внимание уделено методам и средствам проектирования межблочных электрических соединений и БНК, а также вопросам создания моделей и алгоритмов проектирования. Отдельно рассмотрены методы проектирования электромонтажа с использованием непаяных контактных соединений. Монография предназначена для разработчиков электронных средств. Вместе с тем, она может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

