

УДК 621. 316.5  
О. В. ХОМИЦКИЙ,  
канд. техн. наук

МЕТОД РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ  
ЗАМЫКАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Качество функционирования приборов и устройств автоматики во многом определяется контактными элементами. Прогнозирование надежности приборов возможно только при наличии удобных инженерных методов расчета параметров контактов. Надеж-

ность замыкания электрических контактов целесообразно рассматривать в два этапа [1]. В большинстве случаев можно ограничиться нахождением вероятности замыкания, т. е. создания металлического или квазиметаллического контакта, что является содержанием первого этапа анализа. Рассмотрим возможный метод расчета, учитывающий только действие механических факторов.

В пределах фактической площади соприкосновения  $A_{\phi}$  имеется  $n_{вф}$  точек, которые могут участвовать в создании металлического контакта. Их количество пропорционально  $A_{\phi}$  и может быть найдено либо экспериментально, либо из рассмотрения характеристик поверхности и загрязнения. Закон распределения высоты максимального выступа в пределах  $A_{\phi}$ , а следовательно, и вероятность незамыкания при действии механической силы, может быть найден в соответствии с методами теории экстремальных значений [2], как

$$Q_N(R_k) = F_{A_{\phi}}(h_{шм}) = [F_{A_{\phi}}(h_{шм})]^{n_{вф}}, \quad (1)$$

где  $F_{A_{\phi}}(h_{шм})$  — функция распределения высоты максимального выступа  $h_{шм}$  в пределах  $A_{\phi}$ ;

$F_{A_{\phi}}(h_m)$  — функция распределения высоты шероховатости в пределах  $A_{\phi}$ .

Такой расчет вероятности отказа является наиболее точным. Но сложность распределений и практически только экспериментальный путь нахождения  $n_{вф}$  затрудняют его использование.

В связи с этим, предложим более простой, приближенный метод. Характер расчета вероятности отказа зависит от загрязняющего контактного покрытия. Рассмотрим случай, когда на поверхности имеется мономолекулярный слой, не влияющий на сопротивление, и частицы пыли, препятствующие созданию контакта по металлу.

Так как при сближении поверхностей вначале возникает контакт по частицам пыли и только в дальнейшем вступает в соприкосновение металл, можно считать, что вся сила приложена к непроводящим частицам, которые деформируются и вдавливаются.

Используя зависимости [3; 4], получим

$$N = H_{в пр} \cdot A_c \left[ e^{-\left(\frac{z}{a_{\Sigma}}\right)^{m_{\Sigma}}} - e^{-\left(\frac{z}{a_{ш}}\right)^{m_{ш}}} \right], \quad (2)$$

где  $N$  — контактное нажатие;

$H_{в пр}$  — приведенная твердость деформируемой среды;

$A_c$  — контурная поверхность соприкосновения;

$z$  — расстояние между деформирующей и базовой плоскостями;

$a_{\Sigma}, a_{ш}, m_{\Sigma}, m_{ш}$  — параметры распределений Вейбулла, описывающих загрязненную и чистую шероховатую поверхности.

Контакт по металлу возникает тогда, когда условная деформирующая поверхность приближается до уровня наиболее высоких выступов. Это при нормальном распределении высоты шероховатости соответствует примерно  $3H_{ск}$  от базовой плоскости.

Учитывая возможное отклонение характеристик в сторону равновероятного распределения, предельную высоту выступа следует считать величиной случайной, распределенной ориентировочно в пределах  $2,5H_{ск} \div 3H_{ск}$ .

Уравнение (2) исходит из бесконечного распределения шероховатости и размера частиц. Усеченные распределения, усложняя расчетные зависимости, не дают в данном случае существенного выигрыша в точности.

Выполним следующее преобразование:

$$k_{п} = e^{-\left(\frac{z}{a_{\Sigma}}\right)^{m_{\Sigma}}} - e^{-\left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}}} = e^{-\left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}}} \cdot \left[ e^{-\left(\frac{z}{a_{\Sigma}}\right)^{m_{\Sigma}}} + \left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}} - 1 \right].$$

Так как

$$\left| -\left(\frac{z}{a_{\Sigma}}\right)^{m_{\Sigma}} + \left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}} \right| \ll 1,$$

$$m_{\Sigma} \approx m_{\text{ш}}, \quad a_{\Sigma} = \frac{3H_{ск} + \bar{h}_r}{b_{m1}}, \quad a_{\text{ш}} = \frac{3H_{ск}}{b_{m2}}, \quad b_{m1} \approx b_{m2},$$

то

$$k_{п} \approx e^{-\left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}}} \cdot \left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}} \cdot \left[ 1 - \left(\frac{a_{\text{ш}}}{a_{\Sigma}}\right)^{m_{\text{ш}}} \right] =$$

$$= e^{-\left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}}} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{\bar{h}_r}{3H_{ск}}\right)^{m_{\text{ш}}}} \right] \cdot \left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}} \approx$$

$$\approx e^{-\left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}}} \cdot \left(\frac{z}{a_{\text{ш}}}\right)^{m_{\text{ш}}} \cdot \frac{m_{\text{ш}} \cdot \bar{h}_r}{3H_{ск}}.$$

Если

$$m_{\text{ш}} \approx 3,3; \quad b_m = 0,897, \quad z = 6H_{ск},$$

$$z_M = (0,897 \cdot 2)^{3,3} \cdot \exp[-(0,897 \cdot 2)^{3,3}] \approx 0,007,$$

$$z = 5,5H_{ск}, \quad z_M = (0,897 \cdot 1,835)^{3,3} \cdot \exp[-(0,897 \cdot 1,835)^{3,3}] \approx 0,029.$$

В среднем, для диапазона  $\bar{z} = 0,018$ . Поэтому, приближенно

$$k_{п} = \bar{z}_M \frac{m_{\text{ш}} \cdot \bar{h}_r}{3H_{ск}}.$$

В этом случае

$$N = N_{в пр} \cdot A_c \cdot z_M \cdot \frac{m_{\text{ш}} \cdot \bar{h}_r}{3\sigma_{\Sigma}}. \quad (3)$$

Уравнение (3) связывает силу, которая необходима для создания контакта по металлу, что определяется величиной  $z_M$ , и

среднюю толщину загрязнения  $h_r^*$  в пределах фактической поверхности соприкосновения. Так как  $A_\phi \ll A_c$ , и часть поверхности, покрытая пылью, составляет малую долю контурной, то можно считать, что толщина загрязнения является величиной случайной. Следовательно, согласно [4] можно получить распределение нажатия, обеспечивающего контакт по металлу.

Для более точного расчета можно по законам распределения входящих в (3) величин, найти распределение  $f(h_r^*)$  — толщины слоя  $h_r^*$ , который будет деформирован заданной силой для получения контакта по металлу.

Теперь можно найти композицию распределений

$$f(h_p) = f(h_r) * f(h_r^*), \quad (4)$$

где

$$h_p = h_r - h_r^*.$$

Вероятность отказа будет равна

$$Q_N(R_k) = \int_0^\infty f(h_p) dh_p. \quad (5)$$

В тех случаях, когда дисперсия  $h_r$  значительно превосходит дисперсию  $h_r^*$ , последнюю можно считать величиной неслучайной.

Учитывая положения [4], получим

$$\begin{aligned} q_n = 1 - F_2(h_r) &= \frac{A_{nm}}{A_c} - \int_{d_{en}}^{h_r} \frac{\pi}{4} n_{s1m} d_e d_{en} l^{-\frac{d_e - d_{en}}{a_r}} d(d_e) = \\ &= \frac{\pi}{4} n_{s1m} \cdot a_r^2 \cdot d_{en} \cdot e^{-\frac{h_r - d_{en}}{a_r}} \left(1 + \frac{h_r}{a_r}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

После подстановки  $n_{s1m}$

$$q_n = \frac{n_{0r}}{k_{вп} + n_{0r}} \cdot \frac{a_r + h_r}{a_r + d_{en}} \cdot e^{-\frac{h_r - d_{en}}{a_r}}. \quad (7)$$

Вероятность отказа при замыкании поверхностей равна

$$Q = 1 - (1 - q_n)^2 \approx 2q_n. \quad (8)$$

Так как  $k_{вп} \gg n_{0r}$ , то

$$Q = 2 \cdot k_{вп}^{-1} \cdot n_{0ru} \cdot \frac{a_r + h_r}{a_r + d_{en}} \cdot e^{-\frac{h_r - d_{en}}{a_r}},$$

$$h_r \gg d_{en}.$$

Вероятность отказа контактов будет равна

$$Q_N(R_k) = 2k_{вп}^{-1} n_{0ru} \frac{a_r + h_r^*}{a_r + d_{en}} e^{-\frac{h_r^* - d_{en}}{a_r}}. \quad (9)$$

Если величина  $h_r^*$  весьма мала, или даже  $h_r^* < d_{ен}$ , расчет по (9) невозможен. В этом случае можно найти  $\bar{h}_r$ ,  $\sigma_r$ , и по (2) характеристики силы, необходимой для создания контакта по металлу. По этим данным и силе сжатия контактов может быть найдена оценка вероятности отказа, например, способами, рассмотренными в [5].

Пример. Расчет вероятности отказа контактов при нажатии, не превышающем единиц миллиграммов.

Используем экспериментальные данные, приведенные в [6]. Так как не все параметры, необходимые для расчета, имеются в работе, то выполним только проверку правильности функционирования полученных расчетных зависимостей. Недостающие величины выберем, исходя из типичных условий.

Исходные данные для расчета:

а) согласно [6] —

контактная пара: сфера (радиусом  $0,0254 \div 0,01225$  мм) — плоскость;

материал контактов: платино-золото-серебряный сплав (PGS); испытания выполнялись в сушилке при изменяющейся концентрации пыли и контактном нажатии;

минимальная измеряемая частица  $d_{ен} = 0,5$  мк;

б) принятые —

радиус сферического контакта  $R_{сф} = 78 \cdot 10^{-4}$  см;

раствор контактов,  $l_k = 1$  см;

время движения контактов при замыкании,  $t_{ср} = 1$  сек;

частота срабатывания контактов,  $f = \frac{1}{100} \frac{1}{час}$ ;

плоский контакт шероховатый, 9-й класс чистоты поверхности  $H_{ск} = 0,4$  мк,  $r_0 = 800$  мк;

сферический контакт гладкий;

$d_e = 10^{-4}$  см;  $m_r = 1$ ;  $d_{ен} = 10^{-5}$  см;

$k_{вр} = 10^6$  шт/см<sup>3</sup>;

$\gamma_{к2} = 1$  г/см<sup>3</sup>;

$\eta^* = 181 \cdot 10^{-6}$  пуаз;

$D = 2,74 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/сек;

твердость пыли  $H_{п} = 10^3$  кг/см<sup>2</sup>;

твердость металла (Au — 60%; Ag — 25%; Pt — 6%)

$H_{м} = 1,12 \cdot 10^4$  кг/см<sup>2</sup> [7];

модуль упругости золота  $E_{Au} = 8 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>.

Рассчитаем вероятность отказа при замыкании.

Можно показать, что запыление в данном случае определяется диффузией. Другими процессами можно пренебречь.

Контурная поверхность соприкосновения равна

$$A_c^t = 2\pi R_{сф} h_{сегм} = 2\pi \cdot 78 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4} = 1,175 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2.$$

Шероховатость суммарной поверхности

$$\sigma_{\Sigma} = 2,3H_{ск} = 0,92 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

Среднюю толщину пылевого покрытия найдем по [4], учитывая, что запыляются обе поверхности:

$$\bar{h}_r = 2n_{0ru} \frac{a_r}{k_{вп} \left(1 + \frac{d_{ен}}{a_r}\right)} e^{\frac{d_{ен} - d_{ен}}{a_r}} \left(2 + 2 \frac{d_{ен}}{a_r} + \frac{d_{ен}^2}{d_r^2}\right) = 5,5 \cdot 10^{-10} \cdot n_{0ru}.$$

Вероятность незамыкания найдем из условия отсутствия контакта по металлу.

Исходя из нормального распределения высоты шероховатости при его приближенной замене распределением Вейбулла, получим  $m_{ш} = 3,3$ .

Приведенная твердость равна

$$\frac{1}{H_{в пр}} = \frac{1}{10^3} + \frac{2}{1,12 \cdot 10^4}; \quad H_{в пр} = 850 \text{ кг/см}^2.$$

Средняя величина нажатия, необходимая для создания контакта по металлу, равна

$$\bar{N} = A_{\phi} H_{в пр} \cdot 0,018 \frac{3,3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-10}}{3\sigma_z} \cdot n_{0ru} = 11,8 \cdot 10^{-10} n_{0ru}.$$

Оценим вероятность отказа при замыкании в случае различной концентрации пыли:

$$Q \leq q_0 + \frac{\bar{N}}{2N},$$

где  $q_0$  — вероятность отказа, соответствующая нулевой концентрации;

$N$  — контактное нажатие.

Результаты расчетов приведены на рис. 1 (сплошная линия — расчет, штриховая — эксперимент) и в табл. 1.

Таблица 1

$n_{0ru}$ (шт/см <sup>3</sup> )	0	200	400	600	800	1200
$N = 1,8 \text{ мг}$ (рис. 1)						
$Q$	0,32	0,39	0,45	0,52	0,58	0,71
$N = 12,6 \text{ мг}$ (рис. 2)						
$Q$	0,256	0,265	0,275	0,28	0,296	0,31

Оценим вероятность отказа при изменяющемся нажатии и постоянной запыленности. Так как данные [6] содержат результирующую вероятность отказа  $Q$  вследствие действия пленок  $d_{пл}$  и пыли  $q_{п}$ , выделим долю «пылевых» отказов, как

$$q_{п} \approx Q - q_{пл}.$$

Оценку проведем по формуле

$$q_{\text{п}} \leq \frac{\bar{N}}{2N}$$

Результаты расчетов приведены на рис. 2 и в табл. 2.

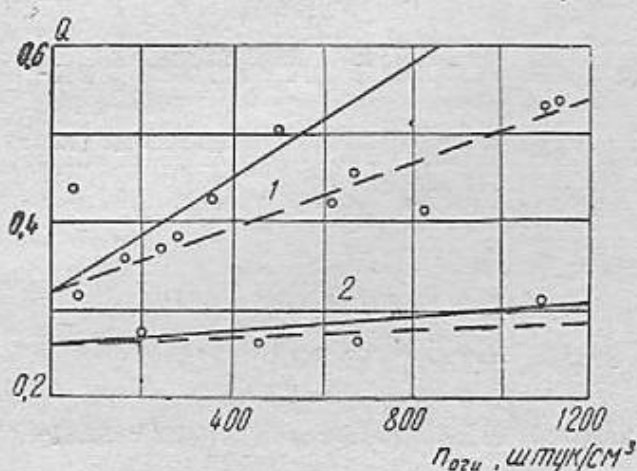


Рис. 1.

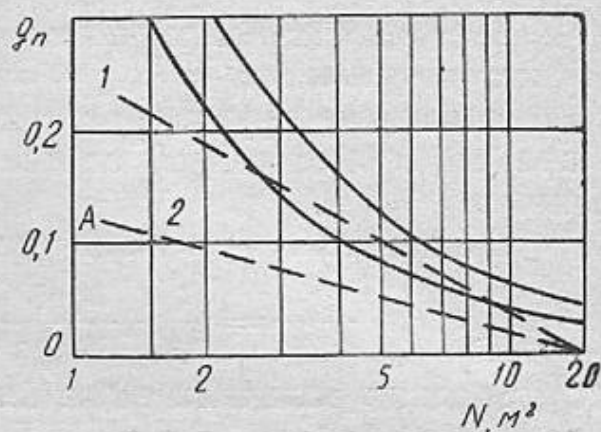


Рис. 2.

Таблица 2

$N, \text{ мг}$	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0	15,0
-----------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------

$n_{\text{очи}} = 1100 \text{ шт/см}^3$  (Рис. 1)

$Q$	0,434	0,325	0,217	0,13	0,093	0,065	0,0434
-----	-------	-------	-------	------	-------	-------	--------

$n_{\text{очи}} = 740 \text{ шт/см}^3$  (Рис. 2)

$Q$	0,291	0,218	0,145	0,0875	0,0625	0,0437	0,0291
-----	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хомицкий О. В. О расчете интенсивности отказов при замыкании контактов реле.— В сб.: Приборы и системы автоматики. Вып. 20, 1971, с. 48—52.
2. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики, М., «Наука», 1965. 511 с.
3. Хомицкий О. В. Метод расчета фактической площади соприкосновения поверхностей электрических контактов.— В сб.: Приборы и системы автоматики. Вып. 25, 1973, с. 51—59.
4. Хомицкий О. В. Пленки и пыль на поверхности электрических контактов.— НИИЭИР, РИР, № 18, реф. 17.089, 1970, с. 76.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. М., «Сов. радио», 1969. 487 с.
6. Maddock A. J., Fielding C. C., Batchelor J. H., Jiggins A. H. The effects of dust and force upon certain very light electrical contacts.— British Journal of Applied Physics, vol. 8, December, 1957, p. 471—476.
7. Усов В. В. Металловедение электрических контактов. М., Госэнергоиздат, 1963. 208 с.

УДК 621. 316. 5

Метод расчета вероятности замыкания электрических контактов. Хомичкий О. В. Сб. «Автоматизированные системы управления и приборы автоматики», вып. 34, 1975, с. 168—174.

Надежность приборов и устройств автоматики зависит от качества функционирования контактных элементов.

Рассматривается расчет вероятности создания контакта соприкасающихся поверхностей. Показана возможность анализа методами теории экстремальных знаний. Предложен приближенный метод расчета, базирующийся на использовании аналитической модели деформации поверхностных загрязнений и выступов шероховатости. Получены формы для расчетов. Приведен пример расчета, результаты которого сравниваются с экспериментальными данными.

Табл. 2. Ил. 2. Библиогр. 7.