

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМАЗОРА НА ОСНОВНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РЕЛЕ

В.Л.Дятлов, В.А.Пьянков

Известны отдельные предложения по применению в электростатических реле сложных форм зазоров как с целью уменьшения напряжения срабатывания, так и с целью увеличения хода контактов [1,2]. Представляет интерес провести исследование различных форм исходного зазора вдоль мембраны, который может быть описан суперпозицией квадратичной и линейной функций, с целью выявления наиболее приемлемых характеристик этих ПЭР. Результаты математического анализа таких пленочных электростатических реле можно представить посредством известных функций.

На рис.1 показаны продольные разрезы: "а" - параболического ПЭР и "б" - углового ПЭР. Расчет характеристик этих ПЭР и ПЭР с промежуточными формами зазоров сделан в следующих приближениях:

1. Рассматривается цилиндрический прогиб мембраны и не учитывается её сопротивление изгибу.
2. Размер контакта по оси X считается пренебрежимо малым.

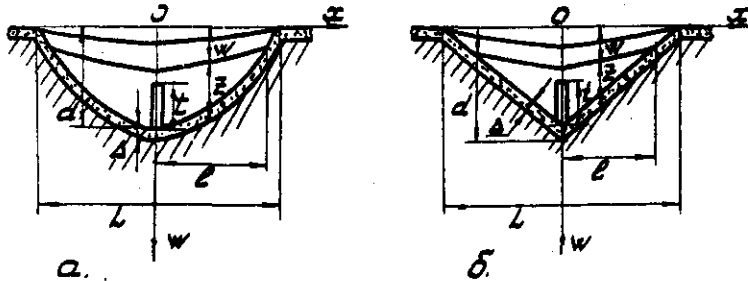


Рис.1. а) Параболическое ПЭР. б) Угловое ПЭР.

Так называемый эффективный зазор в каждой точке (по X) можно представить выражением:

$$z = \frac{\Delta}{\epsilon} + d - w - ax^2 - bx \quad (1)$$

где соотношение между коэффициентами a и b устанавливается в параметрической форме согласно выражению:

$$b \frac{L}{2} = \gamma d \quad \text{и} \quad a \left(\frac{L}{2}\right)^2 = (1-\gamma)d, \quad (2)$$

$$0 \leq \gamma \leq 1.$$

Условия равновесия мембраны находятся из уравнений:

$$N \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{\epsilon_0 U_y^2}{2 \left(\frac{\Delta}{\epsilon} + d - w - ax^2 - bx\right)^2} = 0, \quad (0 < x < \frac{L}{2}), \quad (3)$$

$$2bN \left(\frac{dw}{dx}\right)_{x=0} = - \frac{\epsilon_0 U_k^2 S_k}{2(d-t-w_m)^2}, \quad (x=0). \quad (4)$$

Здесь X - линейная координата, w - прогиб, $N = \epsilon_0 h$ - напряжение, отнесенное к ширине мембраны b , $d - ax^2 - bx$ - расстояние между невозмущенной мембраной и диэлектриком, Δ - толщина диэлектрика, ϵ - диэлектрическая постоянная, $S_k = b_k l_k$ - площадь нижнего контакта, U_y - напряжение управления, U_k - коммутируемое напряжение.

Вводя обозначения $K = \frac{\epsilon_0 U_y^2}{2N}$, $K_1 = \frac{\epsilon_0 U_k^2 S_k}{4bN}$ и переходя к переменной Z согласно (1) представим уравнения (3) и (4) в форме:

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{K}{z^2} - 2a, \quad (0 < x < \frac{L}{2}), \quad (5)$$

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_{x=0} = \frac{K_1}{(z_m - t - \frac{\Delta}{\epsilon})^2} - b, \quad (x=0). \quad (6)$$

Слева ($X=0$) имеем всегда условие (6) и $Z = Z_m$, справа ($X > 0$) граничные условия могут быть различны соответственно двум случаям: мембрана не касается профиля внутри лунки и мембрана касается профиля внутри лунки.

В первом случае $Z = \frac{\Delta}{\epsilon}$ при $x = \frac{L}{2}$; при этом решение задачи (5) получается в виде эллиптических интегралов I-го рода; во втором случае $\left(\frac{dz}{dx}\right)_{x=L} = 0$ и $Z = \frac{\Delta}{\epsilon}$ при $x = L \leq \frac{L}{2}$; из (5) и (6) можно получить выражение вида:

$$K = \frac{A}{\epsilon} z_m \left\{ \frac{1}{2(z_m - \frac{A}{\epsilon})} \left[\frac{K_1}{(z_m - t - \frac{A}{\epsilon})^2} - b \right]^2 + 2a \right\} \quad (7)$$

Здесь наиболее существенным является вопрос об определении напряжений срабатывания (U_{cp}). Анализ решений (5) для двух видов граничных условий приводит к выводу, что максимальное значение $U_y = U_{cp}$ следует искать для случая, когда выполняются оба уравнения, представляющие решения (5), т.е. для $x = l = \frac{L}{2}$, $(\frac{dz}{dx})_{x=l} = 0$, $z = \frac{A}{\epsilon}$. В результате, используя соотношения (2) и пренебрегая $\frac{A}{\epsilon}$ по сравнению с величиной t (t - высота нижнего контакта), получаем при $U_K = 0$ для напряжения срабатывания выражение

$$U_{cp} \approx 2(2-\nu) \sqrt{\frac{N}{\epsilon_0}} \frac{d(\frac{A}{\epsilon})^{1/2}}{L} \quad (8)$$

Из (8) при $\nu = 0$ получаем для параболического ПЭР $U_{cp} = U_{cp}^{\vee}$, при $\nu = 1$ - для углового ПЭР $U_{cp} = U_{cp}^{\wedge}$. Напряжение срабатывания обычных ПЭР, т.е. с постоянной величиной исходного зазора согласно [3] для сплошного нижнего электрода при $U_K = 0$ приближенно имеет вид:

$$U_{cp}^{\cup} \approx 1,2 \sqrt{2} \sqrt{\frac{N}{\epsilon_0}} \frac{d^{3/2}}{L} \quad (9)$$

На рис.2 проведено сравнение параболических и угловых ПЭР и обычного ПЭР по напряжениям срабатывания.

Максимальные упругие силы мембраны (силы отрыва) определяем для всех реле при $U_y = 0$ по формуле:

$$F_{отр.} = \frac{4\delta N}{L} (d-t) \quad (10)$$

На рис.2 также приведены значения сил отрыва в функции d .

Из анализа решений задачи (5) получаем характеристики $U_y(w_m)$ при $U_K = const$, которые для углового ПЭР могут быть представлены уравнениями:

$$U_K \approx \sqrt{\frac{8\delta N}{\epsilon_0 L S_K}} (d-t-w_m^0) \sqrt{w_m^0}, \quad (11)$$

$$U_y \approx \sqrt{\frac{N \frac{A}{\epsilon}}{\epsilon_0}} \left[\frac{2d}{L} - \frac{\epsilon_0 U_K^2 S_K}{4\delta N (d-t-w_m^0)^2} \right] \quad (12)$$

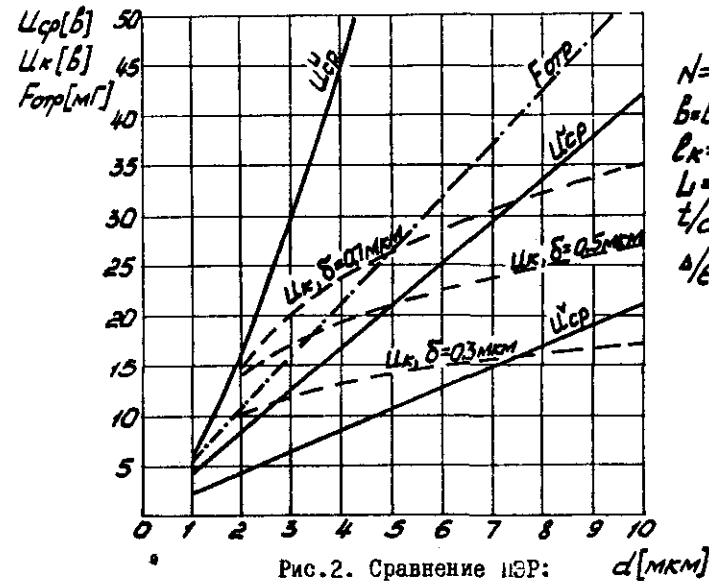


Рис.2. Сравнение ПЭР: d [мкм]
 \cup - обычное реле,
 \vee - параболическое реле,
 \wedge - угловое реле.
 $F_{отр.}, U_K$ одинаковы для всех реле.

Если через δ обозначить величину зазора между мембраной и контактом (при размыкании реле), с которого начинают воздействовать на мембрану силы электростатического напряжения со стороны контакта, то по этим характеристикам можно получить при каждом значении δ : величины предельных коммутируемых напряжений (наибольших значений U_K), величины напряжений отпущения ($U_{отп.}$) при заданном U_K . Предельные коммутируемые напряжения определяются из (11) подстановкой $w_m^0 = d-t-\delta$:

$$U_{K пред.} = \sqrt{\frac{8\delta N}{\epsilon_0 L S_K}} (f-\delta)^{1/2} \delta,$$

где $f = d-t$ - величина хода контактов. На рис.2 приведена зависимость $U_{K пред.}$ в функции d для различных δ .

Из рассмотрения графиков рис.2 следует вывод, что ПЭР с переменным исходным зазором по сравнению с обычными ПЭР имеют:

1. Значительно меньшие $U_{ср}$ (для угловых ПЭР при $d = 5$ мм - в 6 раз).

2. Значительно больший ход контактов (при одинаковых условиях и $U_{ср} \approx 10$ в для обычных ПЭР $d \approx 1,4$ мм, для угловых ПЭР $d \approx 5$ мм).

3. Значительно большие силы отрыва (при одинаковых условиях и $U_{ср} = 10$ в для обычных ПЭР $F_{отр}^U \approx 8$ мГ, для угловых ПЭР $F_{отр}^V = 26,5$ мГ; $b = 100$ мм).

4. Коэффициент усиления больше единицы, при одинаковых длине нижнего контакта и ширине мембраны (для угловых ПЭР при $d = 5$ мм для $\delta = 0,3; 0,5; 0,7$).

По приведенным параметрам наилучшие результаты получаются для угловых реле.

Л и т е р а т у р а

1. СОТСКОВ Б.С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. ГЭИ, 1953.

2. ЧЕСНОКОВ В.В. Решение о выдаче авт. свид. СССР, № 1395318/18-24.

3. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые результаты исследований пленочных электростатических реле. Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Вып. 5. Физико-технологические исследования. Изд-во "Наука", СО АН СССР. Новосибирск, 1968.