УДК 621.318.51

# СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЁНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РЕЛЕ С ВЫСТУПАЮЩИМ КОНТАКТОМ

Т.В.Полина, Б.С.Потапов

Статическое поведение гибкой мембраны, обладающей натяжением $N_0$ на единицу ширины мембраны, под действием электростатических сил как со стороны управляющих электродов, на которые подано напряжение $U_{упр}$, так и со стороны выступающего контакта при напряжении на нем $U_к$, может быть описано с помощью уравнения:

$$\frac{d^2y}{dz^2} + \frac{a}{(1-y)^2} + \frac{b}{(k-y)^2} = 0 \qquad (I)$$

$$\left.\begin{aligned} &z=0 \quad y=y_m; \quad \frac{dy}{dz}=0 \\ &z=1 \quad y=0 \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

$$\left.\begin{aligned} &0<z<z_1, && a=\frac{\varepsilon_0 L^2 U_к^2}{8N_0 d_к^3}, && b=0 \\ &z_1\leqslant z\leqslant z_2, && a=0, && b=0 \\ &z_2<z<z_3, && a=0, && b=\frac{\varepsilon_0 L^2 U_{упр}^2}{8N_0 d_к^3} \\ &z_3\leqslant z\leqslant 1, && a=0, && b=0 \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

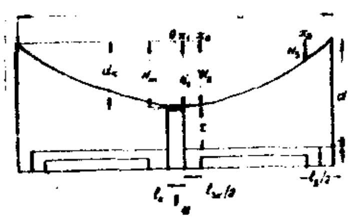

Рис. I

где $z_1$, $z_2$, $z_3$ – нормированные координаты точек $X_1$, $X_2$, $X_3$ гибкой мембраны (рис.I); $y$ – нормированное значение прогиба $W$ мембраны: $z=\frac{X}{L/2}$, $y=\frac{W}{d_к}$; $d_к$ – расстояние от первоначального положения гибкой мембраны до контакта; $L$ – расстояние между опорами реле; $y_m=\frac{W_m}{d_к}$ – нормированное значение максимального прогиба; $k=\frac{d_э}{d_к}=\frac{d_э}{d-t}$ – коэффициент, характеризующий выступание контакта; $t$ – высота контакта; $d_э=\frac{\Delta}{\varepsilon}+d$ – эффективный воздушный зазор между первоначальным положением мембраны и управляющим электродом, где $d$ – расстояние от первоначального положения мембраны до диэлектрика; $\Delta$ – толщина диэлектрика, покрывающего управляющий электрод; $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $N_0=\sigma_0\cdot h$, где $h$ – толщина мембраны, а $\sigma_0$ – нормальное напряжение.

Решение уравнения (I) при условиях (2) и (3) и дополнительном условии непрерывности $y=f(z)$ на всем участке $0\leqslant z\leqslant 1$ дает:

$$(1-y_m)^{3/2}\left[-\frac{\sqrt{(1-y_1)(y_m-y_1)}}{1-y_m}-\frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{1-y_1}+\sqrt{y_m-y_1}}{\sqrt{1-y_1}-\sqrt{y_m-y_1}}\right]+\sqrt{2a}\,z_1=0$$

$$(k-æ)\cdot\left[-\frac{\sqrt{(k-y_2)(æ-y_2)}}{k-æ}-\frac{1}{2}\ln\frac{(\sqrt{k-y_2}+\sqrt{æ-y_2})(\sqrt{k-y_3}-\sqrt{æ-y_3})}{(\sqrt{k-y_2}-\sqrt{æ-y_2})(\sqrt{k-y_3}+\sqrt{æ-y_3})}+\right.$$

$$\left.+\frac{\sqrt{(k-y_3)(æ-y_3)}}{k-æ}\right]+\sqrt{\frac{2b}{k-y_3}+\frac{y_3^2}{(1-z_3)^2}}\cdot(z_2-z_3)=0 \qquad (4)$$

$$\frac{\sqrt{2a}\sqrt{y_m-y_1}}{\sqrt{(1-y_m)(1-y_1)}}+\frac{y_2-y_1}{z_2-z_1}=0$$

$$\frac{y_2-y_1}{z_2-z_1}+\sqrt{\frac{2b}{k-y_3}+\frac{y_3^2}{(1-z_3)^2}-\frac{2b}{k-y_2}}=0$$

где $æ=k-2b$; а $y_1$, $y_2$, $y_3$ – нормированные значения прогиба мембраны в точках $z_1$, $z_2$, $z_3$, соответственно.

Исключением из этих уравнений $y_1$, $y_2$, $y_3$ определяется зависимость $y_m=f(U_{упр}, U_к)$, которая отражает влияние выступающего контакта (при наличии на нем коммутируемого напряже-

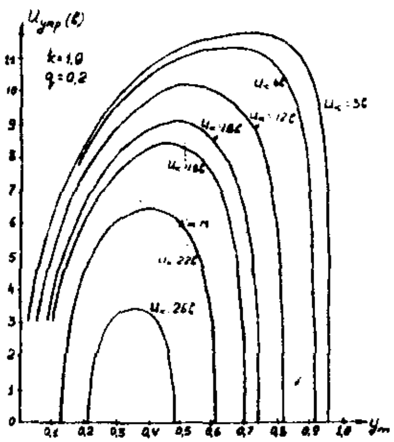


Рис. 2

ния) на напряжение срабатывания реле. В качестве примера рассчитывалось реле классической конструкции с размерами (рис.I): $L$ = I,8 мм, $\ell_к$ = 70 мк, $\ell_{зк}/2$ = II5 мк, $\ell_з/2$ = I40 мк, $d$ = I,2 мк, $\Delta$ = 5000 Å, $h$ = 2 мк, $t$ = 0-0,6 мк и постоянными $\varepsilon = 4$, $\sigma_0$ = 20 кг/мм$^2$. Различия в ширине мембраны $b$ и ширине контакта $b_к$ учитывалось введением в константу $a$ множителя $q = b_к/b$.

Численное решение системы (4), представленное на рис.2 графиком $y_m = f(U_{упр})$ при параметре $U_к$, отражает статическое равновесие мембраны под действием распределенных по её длине электростатической ($F_{эл}$) и упругой ($F_y$) сил. Левая ветвь кривой равновесия (от 0 до такого значения $y_m$, где $U_{упр} = U_{max}$) является ветвью устойчивого равновесия, правая – неустойчивого. Часть плоскости, ограниченная кривой $y_m = f(U_{упр})$ при $U_к = const$ и осью абсцисс, является областью, где $F_{эл} < F_y$ для данного $U_к$, остальная часть плоскости – область, где $F_{эл} > F_y$. Отметим, что одна и та же точка плоскости ($U_{упр}$, $y_m$) может быть точкой, где $F_{эл} > F_y$, или наоборот, в зависимости от значений $U_к$. Например, в точке $M$ (рис.2) ($y_m$ = 0,5; $U_{упр}$ = 6 в) $F_{эл} < F_y$, если $U_к$ < 22 в, $F_{эл} > F_y$, если $U_к$ > 22 в.

Точки пересечения кривых равновесия с осью абсцисс есть максимальный прогиб мембраны под действием только коммутируемого напряжения, т.е. $y_m = f(U_к)$ при $U_{упр} = 0$.

Максимальное значение $U_{упр}$ для данного $U_к$ есть величина напряжения срабатывания реле при наличии на выступающем контакте коммутируемого напряжения. Влияние $U_к$ на напряжение срабатывания реле ($U_{сраб}$) хорошо прослеживается с помощью графика рис.3, где представлены функции $U_{сраб} = f(U_к)$ для различных значений $t$ и $q$. Отметим, что при $U_к$ = 0 рассчитываемый вариант ПЭР имеет $U_{сраб}$ = II,65 в.



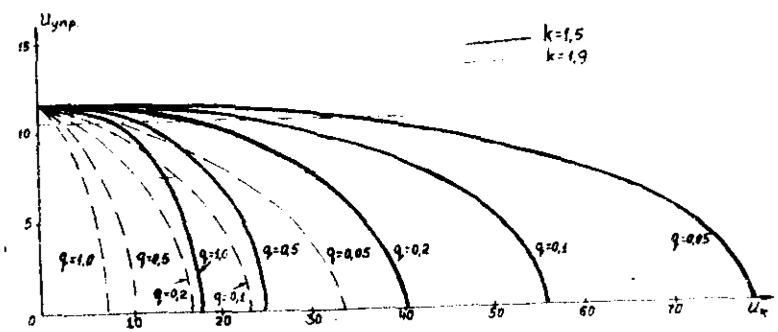


Рис.3.

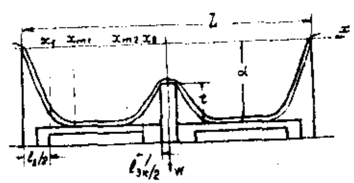


Рис.4.

После срабатывания ПЭР прогибы мембраны на участках (0, $Z_{m2}$) и ($Z_{m1}$, I) не влияют друг на друга (рис.4) и могут определяться независимо. Тогда, принимая за напряжение отпускания то напряжение $U_{упр}$, при котором мембрана касается диэлектрика в одной точке, определим его для ПЭР с выступающим контактом из решения системы уравнений:

$$
\begin{aligned}
&(1-y_m)^{3/2}\left[-\frac{\sqrt{(1-y_{1i})(y_{mi}-y_{1i})}}{1-y_{mi}}-\frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{1-y_{1i}}+\sqrt{y_{mi}-y_{1i}}}{\sqrt{1-y_{1i}}-\sqrt{y_{mi}-y_{1i}}}\right]+\\
&+\sqrt{2a_i}\cdot(Z_{1i}-Z_{mi})=0\\
&\frac{\sqrt{2a_i}\cdot\sqrt{y_{mi}-y_{1i}}}{\sqrt{(1-y_{1i})(1-y_{mi})}}-\frac{y_{1i}}{1-Z_{1i}}=0 \qquad (5)\\
&Z_{m1}+Z_{m2}=1
\end{aligned}
$$

где для участка ($Z_{m1}$, I): $Z_{mi} = Z_{m1}$, $Z_{1i} = 2\ell_з/L$,

$$y_{mi} = \frac{d}{d+\frac{\Delta}{\varepsilon}}, \quad a_i = a_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot U_{упр}^2 \cdot L^2}{8 N_0 \left(d+\frac{\Delta}{\varepsilon}\right)^3};$$

а для участка (0, $Z_{m2}$): $Z_{mi}=Z_{m2}$, $Z_{1i}=2\ell_{3к}/L$

$$y_{mi}=\frac{t}{t+\frac{\Delta}{\varepsilon}}, \quad a_1=a_2=\frac{\varepsilon_0\cdot U_{упр}^2 L^2}{8N_0\left(t+\frac{\Delta}{\varepsilon}\right)^3};$$

Найденная из решения системы (5) зависимость $U_{отп}=f(t)$ приведена на рис.5.

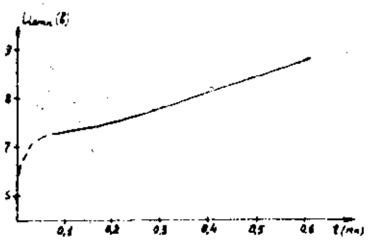


Рис.5.

Обычно под коэффициентом передачи ПЭР понимается отношение коммутируемого напряжения к напряжению срабатывания по управляющим электродам, т.е. $K=\frac{U_к}{U_{сраб}|_{U_к=0}}$. Из анализа кривых равновесия (рис.2) видно, что коммутация в реле напряжения $U_к$ возможна только в том случае, если электрический разрыв контакта (появление на нем полного $U_к$) происходит позже механического ($y_m<1$), т.к. для всех $U_к\neq 0$ в точках $y_m$, лежащих вблизи 1, $F_{эл}>F_y$, и размыкания не произойдет. Напомним (см.стр.6), что электрический разрыв происходит при отходе мембраны от контакта на расстояние $\delta$, величина которого задается конструкцией реле, материалами контакта и параметрами коммутируемой цепи. Именно это расстояние определит максимально возможное коммутируемое напряжение как то напряжение, для которого в точке, отстоящей на расстояние $\delta$ от контакта, $F_{эл}<F_y$. Таким образом, коэффициент передачи ПЭР может быть найден, если известна величина $\delta$. Определение $\delta$, как показано на стр.6, связано с решением задачи о движении мембраны после отхода её от диэлектрика при $U_{упр}\leq U_{отп}$.

Однако, приведенные расчеты позволяют оценить влияние выступающего контакта на коэффициент передачи. Для этого предположим, что полное $U_к$ возникает только тогда, когда мембрана при своем движении удалилась от поверхности контакта и достигла правой неустойчивой ветви кривой $U_{упр}=f(y_m)$ для данного $U_к$ (см.рис.2). В таком предположении максимально возможное $U_к$ находится из графика рис.3 как абсцисса точки пересечения соответствующей кривой $U_{упр}=f(U_к)$ с горизонтальной прямой



$U_{упр}=U_{отп}$. Коэффициент передачи ПЭР для найденных таким способом значений $U_к$ представлен на рис.6 как функция $t$ и $q$.

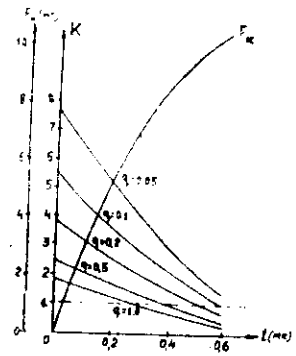


Рис.6.

Другое предельное значение $K$ можно получить из следующего соображения. Поскольку $U_к$ снижает величину $U_{сраб}$, то для обеспечения стабильности реле по напряжению срабатывания (например, не хуже ± 10%), максимальная величина $U_к$ должна определяться как абсцисса точки пересечения кривой $U_{упр}=f(U_к)$ с горизонтальной прямой $U_{упр}=U_{сраб}|_{U_к=0}-10\%$. Зависимость коэффициента передачи от $t$ и $q$ для этого случая показана на рис.7. Как видно, характер зависимости $K=f(t,q)$ не зависит от способа определения $U_к$.

Надежная работа реле предусматривает создание достаточного контактного усилия. В предположении, что контактное давление равно упругой силе мембраны, притянутой к диэлектрику под действием $U_{упр}$, можно оценить контактное давление по простой формуле:

$$F_к=F_y=N_0\cdot\alpha=N_0\cdot\frac{y_1}{Z_1}$$

где $y_1$ находится из решения системы (5). Зависимость $F_к=f(t)$ для $U_{упр}=U_{сраб}$ показана на рис.6,7.

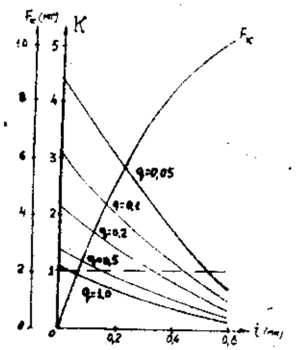


Рис.7.

Как видно, требования максимального коэффициента передачи и определенного контактного давления ограничивают с разных сторон возможные значения $t$ и $q$.

К тому же, напряжение на выступающем контакте уменьшает величину $U_{сраб}$, причем, тем сильнее, чем выше контакт. Для ограничения влияния коммутируемого напряжения на $U_{сраб}$ необходимо уменьшать величину $q$.