

УДК 621.318.56

ТЕОРИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ЕМКОСТНОЙ СТРУКТУРЕ ИЗ ЭЛАСТИКА

В.Л. Дятлов

Еще в 1907 году Баркгаузен [1] и Пуанкаре [2] получили доказательство необходимых условий электромеханического преобразования энергии, из которого вытекает, что одним из необходимых условий возникновения пьезоэлектрического эффекта является изменение емкости.

Изменение емкости пьезоэлектрика

$$\delta C = C \left(\frac{\delta S}{S} - \frac{\delta d}{d} + \frac{\delta \epsilon}{\epsilon} \right),$$

где S - площадь образца; d - толщина образца; ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость материала образца.

Величины $\delta d/d \approx -\epsilon_m$, $\delta S/S \approx \epsilon_m$, $\delta \epsilon/\epsilon = 1 - k_{эм}^2$ [3], где ϵ_m - относительная механическая деформация размеров пьезоэлектрика; $k_{эм}$ - коэффициент электромеханической связи.

Величины максимальных относительных деформаций пьезоэлектриков определяются их модулями упругости (10^{10} - 10^{11} н/м² для керамических и 10^9 н/м² для органических, например, типа ПВДФ) и допустимыми механическими напряжениями и составляют 10^{-3} - 10^{-4} . Величины коэффициентов электромеханической связи для современных сегнетоэлектрических пьезоэлектриков $k_{эм} = 0,1$ - $0,9$ [3]. Таким образом, величины $\delta \epsilon/\epsilon$ на один-три порядка больше чем величины $\delta S/S$ и $\delta d/d$. При этом изменение емкости практически связано лишь с величиной $\delta \epsilon/\epsilon$, и можно говорить о том, что классический пьезоэлектрический эффект в сегнетоэлектриках практически связан только с изменением относительной диэлектрической проницаемости и

что упругие изменения размеров пьезоэлектриков в возникновении классического пьезоэлектрического эффекта играют совершенно второстепенную роль.

Для эластиков допустимые изменения относительных деформаций $\epsilon_m \cong 1$ и больше (модули упругости составляют $10^6 - 10^7$ н/м²) [4]. В этой связи в емкостных структурах, построенных на основе диэлектриков из эластиков, значительное изменение емкости может происходить вследствие упругого изменения структуры. Поэтому сильный пьезоэлектрический эффект в таких структурах также может возникнуть исключительно за счет упругого изменения размеров емкостной структуры. Более того, в этих структурах для сильного проявления пьезоэффекта уже нет необходимости в использовании физического эффекта изменения относительной диэлектрической проницаемости.

Пьезоэлектрический эффект, возникающий в результате упругого изменения размеров пьезоэлектрика, а не за счет изменения относительной диэлектрической проницаемости, можно назвать упругим пьезоэлектрическим эффектом. Цель настоящей работы состоит в построении теории упругого пьезоэлектрического эффекта, основанной на современных теоретических представлениях об упругих свойствах эластиков [4], натяжениях Максвелла в диэлектрической среде [5], моделях пробоя и долговечности органической изоляции в МДМ-структурах [6].

В работе [7] было показано, что использование в качестве упругой диэлектрической среды эластика в емкостной многослойной структуре с жесткими обкладками приводит к большой величине жесткости структуры, при которой электростатические силы не могут вы-

зывать сколько-нибудь значительного изменения размеров структуры. В этой связи возникает интерес к теоретическому рассмотрению такой многослойной структуры с абсолютно растяжимыми обкладками, т.е. с обкладками, не оказывающими механического

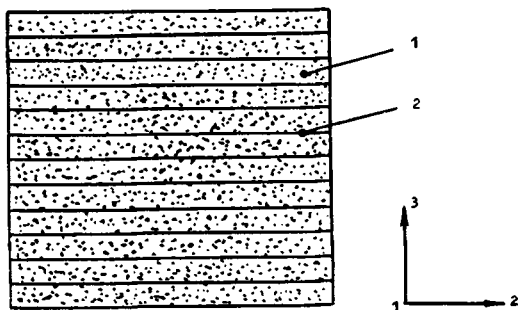


Рис. I

сопротивления своему растяжению. В этом случае жесткость структуры будет определяться только жесткостью неармированного эластичного диэлектрического материала.

На рис. I показана многослойная емкостная структура с диэлектриком из эластика и с абсолютно растяжимыми обкладками. На рис. I: 1 - слой из эластика; 2 - слой абсолютно растяжимого вещества проводящей обкладки.

При теоретическом рассмотрении электромеханических свойств многослойной емкостной структуры с абсолютно растяжимыми обкладками можно положить, чтобы толщина обкладок была много меньше толщины диэлектрического слоя из эластика. При этом условии жесткость структуры будет равна жесткости неармированного эластика.

Из статистической теории деформации полимерных сеток эластиков известно [4], что связь между нормальными механическими напряжениями и относительными размерами дает соотношение

$$\sigma_i - \sigma_j = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - \lambda_j \frac{\partial W}{\partial \lambda_j}, \quad (I)$$

где σ_i, σ_j - нормальные механические напряжения по осям i, j ; λ_i, λ_j - относительные размеры эластика по осям i, j ; W - потенциал механической деформации.

При относительно малых деформациях эластиков, составляющих 50-100%, потенциалы W можно приблизительно представить соотношениями

$$W = \frac{1}{2} G(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (2)$$

для наполненных эластиков и

$$W = A(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - 3), \quad (3)$$

для сшитых эластиков.

Таким образом, для наполненных эластиков

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= G(\lambda_1^2 - \lambda_3^2), \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= G(\lambda_2^2 - \lambda_3^2), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

для сшитых эластиков

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= A(\lambda_1 - \lambda_3), \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= A(\lambda_2 - \lambda_3). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Необходимо иметь в виду также условие несжимаемости материалов эластиков $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$.

Для определенности ось 3 направлена перпендикулярно плоскостям обкладок, оси 1 и 2 направлены вдоль плоскости обкладок (см. рис.1). В этом случае [5]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 &= -(p_3 - p_{эс}), \\ \sigma_1 &= p_{эс}, \\ \sigma_2 &= p_{эс} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $p_{эс} = \frac{\epsilon \epsilon_0 U^2}{2d^2}$ - компоненты тензора натяжения Максвелла по осям

1,2,3; p_3 - внешнее давление сжатия структуры в направлении, перпендикулярном плоскостям обкладок, т.е. внешнее давление по оси 3; U - разность потенциалов между соседними обкладками, напряжение; d - толщина одного слоя эластика структуры; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м.

В рассматриваемой задаче $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ и из условия несжимаемости материала эластика следует, что $\lambda_3 = \lambda^{-2}$, $\lambda_3 = d/d_0$, где d_0 - толщина слоя эластика структуры до ее сжатия.

Из (4) и (6) для наполненного эластика следует, что

$$p_3 + 2p_{эс} = \frac{E_\infty}{3} (\lambda_3^{-1} - \lambda_3^2), \quad (7)$$

а из (5) и (6) для сшитого эластика следует, что

$$p_3 + 2p_{эс} = \frac{2}{3} E_\infty (\lambda_3^{-\frac{1}{2}} - \lambda_3), \quad (8)$$

где E_∞ - равновесный модуль упругости эластика ($E_\infty = 3G = 3/2 A$).

При слабом сжатии эластика, когда $\epsilon_3 = 1 - \lambda_3 \ll 1$, где ϵ_3 - относительная деформация материала эластика по оси 3, уравнения (7) и (8) отражают закон Гука

$$p_3 + 2p_{эс} = E_\infty \cdot \epsilon_3. \quad (9)$$

Из (9) видно, что сжатие слоя эластика электростатическим давлением по оси 3 и одновременное растяжение его электростатическим давлением по оси 1 и 2 при условии несжимаемости эластика эквивалентно действию удвоенного электростатического давления $p_{эс}$ по оси 3. Таким образом, конденсатор с эластичным диэлектриком и

абсолютно растяжимыми обкладками представляет собой уникальный пример электрической машины, в которой одновременно используются как нормальные, так и тангенциальные компоненты тензора натяжения Максвелла. Известно, что во всех электрических машинах с подвижными и неподвижными деталями, выполненными из жестких материалов, используются либо нормальные, либо тангенциальные компоненты тензора натяжения Максвелла. Так, например, в электромагнитах используются только нормальные компоненты, а в электромагнитных и электростатических машинах вращения используются только тангенциальные компоненты натяжения Максвелла.

На рис.2 показаны функции

$$\varphi_1(\lambda_3) = \frac{1}{3}(\lambda_3^{-1} - \lambda_3^2); \quad \varphi_2(\lambda_3) = \frac{2}{3}(\lambda_3^{-\frac{1}{2}} - \lambda_3),$$

которые входят в соотношения (7) и (8) соответственно. Из рис.2 видно, что для λ_3 степени сжатия слоев эластика в направлении, перпендикулярном плоскостям обкладок, в интервале $0,5 \leq \lambda_3 \leq 1$ функции $\varphi_1(\lambda_3)$ и $\varphi_2(\lambda_3)$ отличаются незначительно. В то же время эти функции достаточно точно отражают процесс сжатия эластика именно в указанном интервале изменения относительных размеров [4].

Электростатическое давление (компонента тензора натяжения Максвелла) при учете очевидного соотношения $d = d_0 \lambda_3$, где d_0 - толщина слоя эластика при напряжении $U = 0$, можно представить так:

$$p_{эс} = p_{эс}^{(0)} \cdot \lambda_3^{-2}, \quad (10)$$

где $p_{эс}^{(0)} = \frac{\epsilon \epsilon_0 U^2}{2d_0^2}$ - электростатическое давление при $d = d_0$.

Из (7) и (10) следует, что

$$p_3 = E_\infty F(\lambda_3) - 2p_{эс}^{(0)} \cdot \lambda_3^{-2}, \quad (11)$$

где $F(\lambda_3) = \varphi_1(\lambda_3)$ - для наполненных эластиков и $F(\lambda_3) = \varphi_2(\lambda_3)$ - для сшитых эластиков.

Можно представить, что давление p_3 в структуре образовано в результате действия на структуру по оси 3 силы P_3 . Тогда $P_3 = p_3 S$, где $S = S_0 \lambda_1 \lambda_2 = S_0 \lambda^2 = S_0 \lambda_3^{-1}$ - площадь обкладок структуры в некоторой средней ее части (по оси 3); S_0 - площадь обкла-

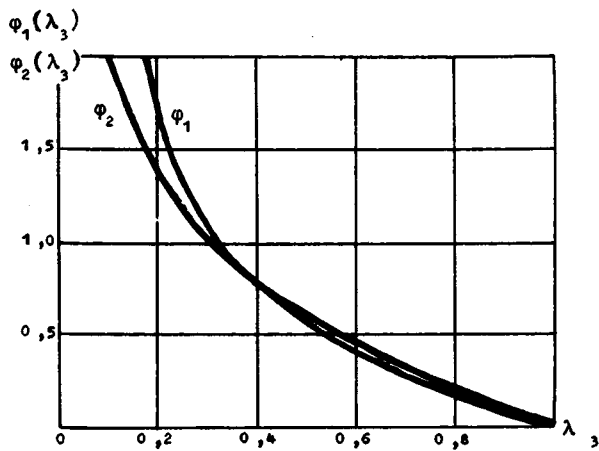


Рис.2

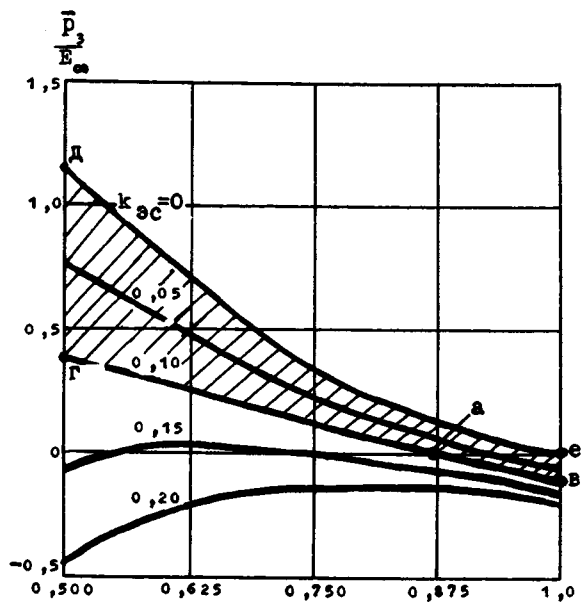


Рис.3

док структуры при $U = 0$. В этом случае более удобной расчетной величиной является не давление p_3 , а, например, величина $\bar{p}_3 = p_3/S_0 = p_3 S/S_0 = p_3 \lambda_3^{-1}$, непосредственно связанная с силой P_3 . При использовании переменной \bar{p}_3 уравнение (II), очевидно, можно представить так:

$$\bar{p}_3 = E_{\infty} F(\lambda_3) \cdot \lambda_3^{-1} - 2p_{\text{ЭС}}^{(0)} \lambda_3^{-3}. \quad (12)$$

Уравнение (12) описывает обратный пьезоэлектрический эффект в рассматриваемой структуре, т.е. оно отражает механическое действие при приложении к структуре напряжения U , так как $p_{\text{ЭС}}^{(0)}$ является функцией напряжения.

На рис.3 показана зависимость

$$p = \frac{\bar{p}_3}{E_{\infty}} = F(\lambda_3) \cdot \lambda_3^{-1} - k_{\text{ЭС}} \lambda_3^{-3}, \quad (13)$$

где $F(\lambda_3) = \varphi_1(\lambda_3)$; $k_{\text{ЭС}} = 2p_{\text{ЭС}}^{(0)}/E_{\infty}$. Значения $k_{\text{ЭС}}$ приняты равными 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,2.

Точки пересечения каждой кривой $p(\lambda_3)$ при $k_{\text{ЭС}} = \text{const}$ с осью абсцисс ($p = 0$) отражают устойчивое (точка "а" при $k_{\text{ЭС}} = 0,1$) и неустойчивое равновесие. Значения $\lambda_3^{(a)} < 1$, соответствующие устойчивым точкам равновесия, отражают относительное уменьшение размера структуры по оси 3 для каждого из значений $k_{\text{ЭС}} \neq 0$ при $p = 0$. Соответственно $\epsilon_3^{(a)} = 1 - \lambda_3^{(a)}$ — относительное сжатие структуры при этом значении $k_{\text{ЭС}}$ и при $p = 0$. Из рис.3 видно, что существуют значения $k_{\text{ЭС}} > 0,15$ (более точно, $k_{\text{ЭС}} \geq 0,158$; $\lambda_3 = 0,63$; $p = 0$), при которых не имеется ни одной точки пересечения кривой $p(\lambda_3)$ с осью абсцисс. В этих случаях при внешнем давлении $p = 0$ наступает коллапс, полное сокращение структуры, при котором $\lambda_3 \rightarrow 0$. Это чисто теоретический результат, поскольку при малых значениях λ (меньше 0,5) упругий потенциал эластика W уже не отражает достаточно точно соотношения (2) или (3) [4]. В настоящем рассмотрении введено ограничение $\lambda_3 \geq \lambda_3^*$, где λ_3^* — минимальное значение λ_3 , которое позволяет устранить возникающее осложнение и при $k_{\text{ЭС}} > 0,158$. Это ограничение можно рассматривать как изменение в структуре некоторого механического упора.

Электрический процесс в структуре отражается соотношением

$$D_3 = \epsilon \epsilon_0 E_3 = \epsilon \epsilon_0 \cdot \frac{U}{d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 U}{d_0 \lambda_3}, \quad (14)$$

где D_3 - электростатическая индукция в эластичном диэлектрике, или плотность зарядов на обкладках в структуре; E_3 - напряженность поля в эластичном диэлектрике.

Полный заряд на одной обкладке структуры

$$Q = D_3 S. \quad (15)$$

Из (15) и (14) следует, что

$$\bar{D} = \frac{\epsilon \epsilon_0 U}{d_0 \lambda_3^2}, \quad (16)$$

где $\bar{D}_3 = Q/S_0$ ($\bar{D}_3 = D_3 S/S_0 = D_3/\lambda_3$).

Расчетная величина \bar{D}_3 , в отличие от индукции D_3 , непосредственно связана с зарядом конденсатора структуры.

Уравнение (16) описывает прямой пьезоэлектрический эффект в структуре, т.е. отражает электрическое действие при механическом изменении размеров структуры.

Из (12) видно, что разность между силой P_3 при $P_{эс} = 0$ и силой P_3 при $P_{эс} \neq 0$ для каждого значения λ_3 есть эффективная электростатическая сила

$$P_{эс} = S_0 p_{эс}^{(0)} 2\lambda_3^{-3} = 2S_0 p_{эс}^{(0)} \cdot \frac{d_0^3}{d^3}.$$

За один цикл сжатия-расширения структуры от одного емкостного слоя максимально можно получить, например в колебательном режиме, механическую работу, равную площади между кривыми $P_3(\lambda_3)$ при $P_{эс}^{(0)} = 0$ и $P_3(\lambda_3)$ при $P_{эс}^{(0)} \neq 0$ и прямыми $\lambda_3 = 0$, $\lambda_3 = \lambda_3^*$ (площадь вгде на рис.3 при $k_{эс} = 0,1$; $\lambda_3^* = 0,5$, например). Эта механическая работа, рассчитанная на один емкостный слой, может быть представлена так:

$$A = - \int_{d_0}^{d^*} P_{эс} d(d) = S_0 d_0 p_{эс}^{(0)} [(\lambda_3^*)^{-2} - 1], \quad (17)$$

где d^* - минимальное значение толщины емкостного слоя.

При максимальной сжатии структуры в одном ее емкостном слое накапливается электрическая энергия

$$W_э = QU = S_0 d_0 p_{эс}^{(0)} (\lambda_3^*)^{-2}. \quad (18)$$

При максимальном сжатии структуры в одном ее емкостном слое накапливается механическая энергия для случая диэлектрика из наполненного эластика

$$W_y = - \int_{d_0}^{d^*} (p_{\text{эс}}^{(0)} = 0) d(d) = S_0 d_0 E_{\infty} \frac{1}{3} [(\lambda_3^*)^{-1} + \frac{1}{2} (\lambda_3^*)^2 - \frac{3}{2}] \quad (19)$$

и для случая диэлектрика из сшитого эластика

$$W_y = S_0 d_0 E_{\infty} \frac{2}{3} [2(\lambda_3^*)^{-\frac{1}{2}} + \lambda_3^* - 3] . \quad (20)$$

Сжатие структуры при внешней силе $P_3 = 0$, согласно (13), отражают соотношения для случая диэлектрика из наполненного эластика

$$k_{\text{эс}} = \frac{1}{3} (\lambda_3 - \lambda_3^*) \quad (21)$$

и для случая диэлектрика из сшитого эластика

$$k_{\text{эс}} = \frac{2}{3} (\lambda_3^{3/2} - \lambda_3^3) . \quad (22)$$

Из (21) следует, что величина $k_{\text{эс}}$ имеет максимум, равный 0,158 при $\lambda_3 = 0,63$. Из (22) следует, что величина $k_{\text{эс}}$ имеет максимум, равный 0,167 также при $\lambda_3 = 0,63$.

Условия $k_{\text{эс}} \geq 0,158$ для случая диэлектрика из наполненного эластика и $k_{\text{эс}} \geq 0,167$ для случая диэлектрика из сшитого эластика можно рассматривать как условия большого хода структуры. Эти условия можно представить так:

$$P_{\text{эс}} \geq (0,079-0,084) E_{\infty} . \quad (23)$$

Из (17) вытекает выражение для энергоемкости структуры с эластичным диэлектриком, определяемое как отношение максимальной работы, получаемой от структуры за один рабочий цикл, к объему

$$a = \frac{A}{S_0 d_0} = p_{\text{эс}}^{(0)} [(\lambda_3^*)^{-2} - 1] . \quad (24)$$

В случае большого хода структуры, например при $\lambda_3^* = 0,5$, из (24) следует, что $a = p_{\text{эс}}^{(0)}$.

Величина

$$p_{\text{Эс}}^{(o)} = \frac{\epsilon \epsilon_0 U^2}{2d_0^2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E_0^2}{2},$$

где $E_0 = U/d_0$ — напряженность электрического поля в эластичном диэлектрике при $d = d_0$. Таким образом, $p_{\text{Эс}}^{(o)}$ есть энергоемкость конденсатора, определяемая как отношение накопленной в конденсаторе электрической энергии к его объему [6]. Допустимая величина этой энергоемкости определяется по величине допустимого электрического поля. В свою очередь, допустимая величина электрического поля в конденсаторах рассчитывается исходя из заданной долговечности изоляции по величине допустимого напряжения. Величина допустимого напряжения определяется как некоторое отношение к напряжению возникновения частичных разрядов, которое равно напряжению пробоя заполненных газом пор изоляции. Согласно закону Пашена это напряжение пробоя есть функция произведения толщины пробивного промежутка (например, диаметра поры) на давление газа в поре. При сжатии диэлектрика сжимается и газ в порах^{*)}, при этом произведение толщины пробивного промежутка на давление газа остается постоянным и соответственно остается постоянным напряжение пробоя [8]. Это означает, что для оценки допустимой величины энергоемкости $p_{\text{Эс}}^{(o)}$ можно использовать величины допустимых энергоемкостей пленочных конденсаторов с практически несжимаемой изоляцией.

Для современных пленочных конденсаторов допустимые величины энергоемкостей лежат в пределах 10^4 – $5 \cdot 10^5$ дж/м³ [6]. Если положить $p_{\text{Эс}}^{(o)} = 10^4$ – $5 \cdot 10^5$ дж/м³, то, согласно (23), для величин равновесного модуля упругости эластика должно выполняться условие:

$$E_{\infty} \leq \frac{10^4 - 5 \cdot 10^5}{0,084} = 1,2 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2.$$

Для обычных мягких резин $E_{\infty} = (1,5 - 5,0) \cdot 10^6$ н/м² [9]. Таким образом, если положить $E_{\infty} = 1,5 \cdot 10^6$ н/м², то для получения большого хода в структуре минимальная величина энергоемкости $p_{\text{Эс}}^{(o)}$ должна быть равна $0,084 \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 1,26 \cdot 10^5$ дж/м³. Соответственно и энергоемкость $a = 1,26 \cdot 10^5$ дж/м³. С другой стороны, если принять

*) При малых диаметрах пор газ сжимается изотермически [7].

энергоемкость $\alpha = 10^4 \text{ Дж/м}^3$, то для получения большого хода в структуре максимальная величина равновесного модуля упругости эластика E_∞ должна быть равна $10^4/0,084 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ для спитого эластика и $10^4/0,079 = 1,3 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ для наполненного эластита.

Представляет интерес теоретическое рассмотрение емкостной структуры с эластичным диэлектриком для случая, когда эластик поляризован и представляет собой электрет с электретным напряжением $U_3 = U_0$ или в электрическую схему структуры дополнительно включено постоянное напряжение U_0 , причем суммарное напряжение на структуре $U = U_0 + \delta U$, напряжение $\delta U \ll U_0$ и относительная деформация $\epsilon_3 = 1 - \lambda_3 \ll 1$. В этом случае уравнения обратного и прямого пьезоэлектрических эффектов (I2) и (I6) можно представить в виде системы двух линейных уравнений относительно величин $\delta \epsilon_3 = \lambda_3^{(0)} - \lambda_3$, $\delta p_3 = p_3$, $\delta E_3 = \delta U/d_0$, $\delta D_3 = \bar{D}_3 - \bar{D}_3^{(0)}$, где величины $\lambda_3^{(0)}$ и $\bar{D}_3^{(0)} = \epsilon \epsilon_0 U/d_0 (\lambda_3^{(0)})^2$ равны значениям λ_3 и \bar{D}_3 при $\delta U = 0$, $U = U_0$. Эти уравнения следующие:

$$\left. \begin{aligned} \delta \epsilon_3 &= S_{33} \delta p_3 + d_{33} \delta E_3, \\ \delta D_3 &= d_{33} \delta p_3 + \epsilon_{33} \delta E_3, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где

$$S_{33} = \frac{1}{E_\infty f(\lambda_3^{(0)})};$$

$$d_{33} = \frac{2}{E_0} \cdot \frac{k_{\text{эс}}^{(0)}}{(\lambda_3^{(0)})^3 f(\lambda_3^{(0)})};$$

$$\epsilon_{33} = \epsilon \epsilon_0 \left[(\lambda_3^{(0)})^{-2} + \frac{4k_{\text{эс}}^{(0)} (\lambda_3^{(0)})^{-6}}{f(\lambda_3^{(0)})} \right];$$

$$k_{\text{эс}}^{(0)} = \frac{2p_{\text{эс}}^{(0)}}{E_\infty} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E_0^2}{E_\infty}; \quad E_0 = U_0/d_0.$$

Для случая наполненного эластита

$$k_{\text{эс}}^{(0)} = \frac{1}{3} [\lambda_3^{(0)} - (\lambda_3^{(0)})^4];$$

$$f(\lambda_3^{(0)}) = \frac{1}{3} [4 - (\lambda_3^{(0)})^{-3}] .$$

Для случая сшитого эластика

$$k_{\text{эс}}^{(0)} = \frac{2}{3} [(\lambda_3^{(0)})^{3/2} - (\lambda_3^{(0)})^3] ;$$

$$f(\lambda_3^{(0)}) = \frac{[4 - (\lambda_3^{(0)})^{-3}]}{2\lambda_3^{(0)} + (\lambda_3^{(0)})^{-1/2}} .$$

Система уравнений пьезоэлектрического эффекта (25) для емкостной структуры из эластика в точности совпадает с системой уравнений пьезоэлектрического эффекта для классических пьезоэлектриков

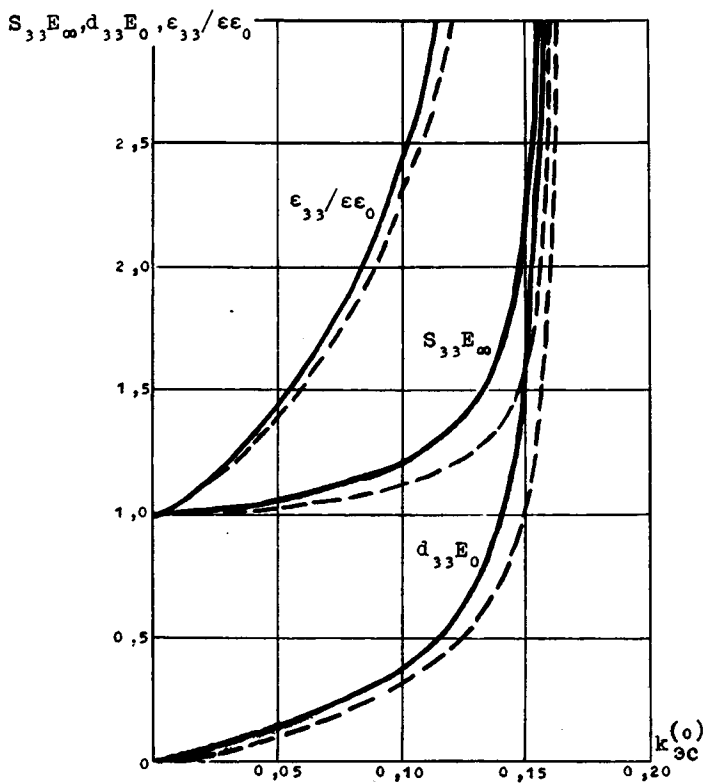
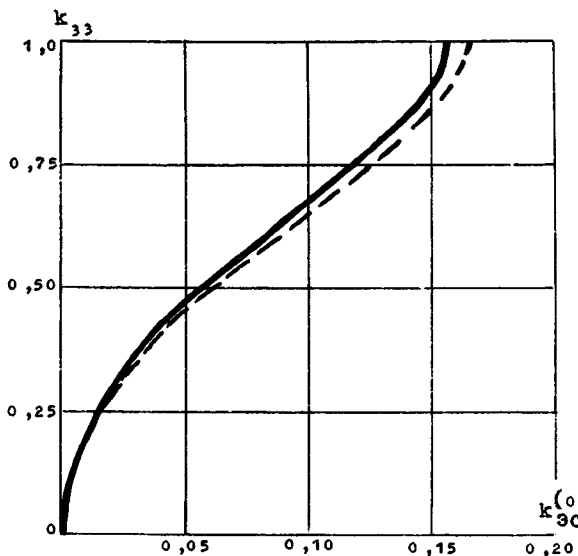


Рис. 4

в "U"-параметрах для случая, когда давление и напряженность поля действуют по полярной оси, оси 3 [3].

На рис.4 показаны зависимости $S_{33}E_{\infty}$, $d_{33}E_0$, $\epsilon_{33}/\epsilon\epsilon_0$ от величины $k_{\text{Эс}}^{(0)} = 2p_{\text{Эс}}^{(0)}/E_{\infty}$. В данном случае $p_{\text{Эс}}^{(0)}$ есть электростатическое давление при $U = U_0$ и $d = d_0$. Сплошными кривыми показаны



зависимости для структуры из наполненного эластика, штриховыми кривыми - для структур из сшитого эластика. При $k_{\text{Эс}}^{(0)} = 0,158$ для структуры из наполненного эластика и $k_{\text{Эс}}^{(0)} = 0,167$ для структуры из сшитого эластика, величины $S_{33}E_{\infty}$, $d_{33}E_0$, $\epsilon_{33}/\epsilon\epsilon_0$ неограниченно возрастают. При $k_{\text{Эс}}^{(0)} > 0,158$ и $k_{\text{Эс}}^{(0)} > 0,167$ для структуры из наполненного и сшитого эла-

Рис.5

стиков соответственно в структуре происходит неограниченное сжатие и уравнения (25) теряют смысл.

Коэффициенты S_{33} , d_{33} и ϵ_{33} полностью характеризуют прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты в рассматриваемой структуре и позволяют провести сравнение рассматриваемой структуры с известными пьезоэлектриками.

На рис.5 показаны зависимости коэффициента электромеханической связи

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\epsilon_{33}S_{33}}} = \frac{(d_{33}E_0)}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon\epsilon_0}\right) \cdot (S_{33}E_{\infty})} \cdot \sqrt{k_{\text{Эс}}^{(0)}}}$$

для рассматриваемой структуры в зависимости от величины $k_{\text{эс}}^{(0)}$ для случая выполнения структуры из наполненного (сплошная кривая) и сшитого (штриховая кривая) эластиков. Из рис.5 видно, что коэффициент k_{33} для рассматриваемой структуры монотонно увеличивается от нуля до единицы при изменении $k_{\text{эс}}^{(0)}$ от нуля до 0,158 для случая структуры из наполненного эластика и до $k_{\text{эс}}^{(0)} = 0,167$ для случая структуры из сшитого эластика. Известно, что коэффициенты электромеханической связи k_{33} для пьезоэлектрических неорганических материалов типа ЦТС, ПКР равны 0,62–0,78 [10], для органических материалов типа ПВДФ равны 0,10–0,2 [11,12].

Рассматриваемая структура обладает высокими значениями пьезомодуля d_{33} , что и выделяет ее среди известных пьезоэлектриков.

Так, например, при $d_{33}E_0 = 0,1$, $k_{\text{эс}}^{(0)} = 0,04–0,05$ (см.рис.4), $k_{33} = 0,40–0,47$ (см.рис.5). Если положить $E_0 = 2 \cdot 10^7$ в/м [4], то $d_{33} = 5000 \cdot 10^{-12}$ к/н.

Известно, что пьезомодули d_{33} для пьезоэлектрических неорганических материалов типа ПКР-7М равны $760 \cdot 10^{-12}$ к/н; ЦТСНВ-I – $430 \cdot 10^{-12}$ к/н [10], для органических материалов типа ПВДФ – $20–40 \cdot 10^{-12}$ к/н [11,12]. Из системы уравнений (25) видно, что высокие значения пьезомодулей d_{33} означают либо высокие значения производных $d\epsilon_{33}/dE_3$, dp_3/dE_3 при обратном пьезоэлектрическом эффекте, либо высокие значения производных dd_3/dp_3 , dE_3/dp_3 при прямом пьезоэффекте.

Итак, показано, что в емкостной структуре из эластика может быть получен сильный пьезоэлектрический эффект за счет только изменения формы структуры.

Л и т е р а т у р а

1. BARKHAUSEN H. Das Problem der Schwingungserzeugung. – S. Hirzel, 1907.

2. POINCARÉ H. Sur quelques théorèmes généraux relatifs à é électrotechnique. – L'éclairage élect., 1907, N 9, p.293.

3. ЯФЕ Б., КУК У., ЯФЕ Г. Пьезоэлектрическая керамика. – М.: Мир, 1974. – 288 с.

4. БЕРТЕНЕВ Г.М., ЗЕЛЕНЕВ Д.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа, 1983. – 392 с.

5. ТАММ И.Е. Основы теории электричества.- М.: ГИФТЛ, 1954. 620 с.
6. КУЧИНСКИЙ Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы.-Л.: Энергия,1973.- 176 с.
7. ДЯТЛОВ В.Л. Пленочная электромеханика - основа создания универсальных пленочных емкостных двигателей с высокой энергоемкостью. - В кн.: Моделирование в пленочной электромеханике (Вычислительные системы, вып.84). Новосибирск,1981,с.3-32.
8. МИК Дж., КРЭГС Дж. Электрический пробой в газах.- М.:ИИЛ, 1960.- 606 с.
9. КОШКИН Н.И., ШИРКЕВИЧ М.Г. Справочник по элементарной физике.-М.: Наука,1980. - 208 с.
10. ФЕСЕНКО Е.Г., ДАНЦИГЕР А.Я., РАЗУМОВСКАЯ О.Н. Новые пьезо-керамические материалы.- Ростов,1983. - 154 с. (Ростовский госуниверситет).
11. ТОМАШПОЛЬСКИЙ Ю.Я. Пленочные сегнетоэлектрики.- М.: Радио и связь,1984. - 191 с.
12. ЧЕТИГНИ. Пьезоэлектрическая пленка Купат-материал для нового класса датчиков. - Электроника,1984,т.57, № 15,с.103-108.

Поступила в ред.-изд.отд.

8 августа 1985 года