

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.317.39:531.7+531.788.8+534.232

Л. Н. СЫРКИН
 (Ленинград)

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

При анализе работы электромеханических преобразователей целесообразен энергетический подход. В качестве критерия эффективности, определяющего эксплуатационные характеристики преобразователя, вводится коэффициент электромеханической связи, квадрат которого (k^2) для прямого преобразования равен отношению запасенной электрической энергии $W_{эл}$ к входной упругой энергии W_y .

Обычно оценка эффективности электроакустических приемников по величине k^2 производилась только для преобразователей генераторного типа (например, пьезоэлектрических и магнитострикционных). Покажем, что для параметрического приемника можно ввести коэффициент электромеханической связи, имеющий такой же физический смысл, что и для генераторного. В параметрических приемниках энергия в выходную цепь прибора поступает не только из акустического поля, но и из входной электрической цепи. Поэтому величина k^2 может достигать и превышать 100%.

Рассмотрим прежде всего емкостный преобразователь. При изменении расстояния D между пластинами плоского конденсатора на x заряд конденсатора Q изменяется на $\Delta Q = \partial Q / \partial D x = \frac{\epsilon S u x}{4\pi D^2}$, а соответствующие изменения электрической и упругой энергии равны: $W_{эл} = \Delta Q^2 / 2C_{эл} = \frac{\epsilon S u^2 x^2}{8\pi D^3}$; $W_y = x^2 / 2C_m$. Отсюда получаем

$$k^2 = \frac{W_{эл}}{W_y} = \frac{4\pi Q^2 C_m}{\epsilon S D} = \frac{4\pi P^2}{\epsilon E_{ю.э}} = \frac{4\pi d_3^2 E_{ю.э}}{\epsilon}, \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; S — площадь пластин; u — напряжение на конденсаторе (постоянное или переменное); C — емкость конденсатора; C_m — эквивалентная механическая гибкость подвижной пластины; $P = Q/S = \epsilon E / 4\pi$ — поляризация; $E = u/D$ — напряженность поля в зазоре; $d_3 = C C_m E$ — эквивалентный пьезомодуль; $E_{ю.э} = D / C_m S$ — эквивалентный модуль Юнга.

Таким образом, выражение для коэффициента электромеханической связи емкостного преобразователя совпадает по форме с аналогичным выражением для пьезоэлектрического материала при условии введения эквивалентных параметров d_3 и $E_{ю.э}$.

Для конденсаторного микрофона с натянутой металлической мембраной (подвижным электродом) $D = (2,5 \div 3) \cdot 10^{-3}$ см; $E = 6$ кв/мм при $u = 200$ в; $\epsilon = 1$; $S = 1,5$ см²; $C = 50$ пф; $C_m = 1,5 \cdot 10^{-10}$ см/дн (гибкость воздушного промежутка, равную 10^{-9} см/дн, можно не учитывать). При этом $E_{ю.э} = (1,1 \div 1,3) \cdot 10^7$ дн/см²; $d_э = 0,15 \cdot 10^{-6}$ cгск; $k = 1,8 \cdot 10^{-3}$. Повышение k ограничено величиной E , которая не может превышать пробивной прочности воздуха. Отсюда видно, что в энергетическом смысле емкостный преобразователь в 100—300 раз менее эффективен, чем пьезокерамический, хотя его чувствительность, характеризуемая отношением $d_э/\epsilon$, может быть выше, чем у пьезокерамического не менее чем в 100 раз, а удельная чувствительность $(d_э/\sqrt{\epsilon})$ — в 2—3 раза. Этот выигрыш достигается исключительно за счет большей гибкости колебательной системы и низкой диэлектрической проницаемости воздуха, что создает дополнительные трудности при согласовании приемника с усилителем.

В емкостных параметрических приемниках накопление упругой энергии происходит в гибких элементах подвижной системы, а электрической — в другой части преобразователя, а именно: в тонком слое диэлектрика между электродами. Поэтому такие преобразователи можно назвать преобразователями поверхностного типа.

Перейдем к анализу работы параметрических преобразователей объемного типа, в которых в любом малом объеме активного материала накапливается упругая энергия и преобразуется в электрическую.

В качестве активных материалов могут применяться диэлектрики, ферромагнетики и проводники (или полупроводники), у которых параметр, определяющий электрический импеданс преобразователя, достаточно сильно зависит от давления. У диэлектрического активного элемента изменение заряда ΔQ при действии давления возникает вследствие изменения диэлектрической проницаемости ϵ . Изменениями же размеров элемента здесь можно пренебречь:

$$\Delta Q = \partial Q / \partial \epsilon \Delta \epsilon = u \Delta \epsilon S / 4\pi D = C u \Delta \epsilon / \epsilon.$$

Отсюда, ограничиваясь случаем однородно-напряженного состояния, получаем:

$$W_{эл} = 1/2 C u^2 (\Delta \epsilon / \epsilon)^2; \quad W_y = 1/2 \xi^2 E_{ю} V;$$

$$k^2 = \frac{W_{эл}}{W_y} = \frac{C u^2 (\Delta \epsilon / \epsilon)^2}{E_{ю} V (\xi \epsilon)} = \frac{4\pi d_э^2 E_{ю}}{\epsilon}, \quad (2)$$

где $d_э = P \gamma = 1/4 \pi \epsilon E \gamma$; V — объем диэлектрика; $\gamma = 1/E_{ю} \chi = \Delta \epsilon / \epsilon \sigma$ — коэффициент чувствительности к давлению; ξ — деформация; σ — механическое напряжение; остальные обозначения — те же, что и ранее.

Наиболее сильной зависимостью ϵ от давления обладают нелинейные сегнетоэлектрические материалы на основе $BaTiO_3$, содержащие добавки $SrTiO_3$ и $SnTiO_3$ (вариконды) [1]. Оценим возможности применения варикондов типа ВК-2 как активных материалов в электромеханических преобразователях параметрического типа. Отметим прежде всего, что хотя формула (2) не отличается от соответствующего выражения для пьезоэлектрика, однако здесь внешнее поляризующее поле E должно быть переменным, так как при наложении сильного постоянного поля ϵ вариконда, а также коэффициент чувствительности γ резко уменьшаются [1]. Поэтому, если в конденсаторном микрофоне увеличение k^2 и $d_э$ ограничено пробивной прочностью воздуха, то в сегнетоэлектрическом параметрическом преобразователе это ограничение связано с ростом диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) и тепловыделением в активном материале.

При $E_{эфф} = 0,5 \text{ кВ/см}$ имеем: $\text{tg } \delta = 0,3 \text{--} 0,4$; $\epsilon = 10^4$; $\kappa = 2 \cdot 10^3$; $\gamma = 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{дн}$; $P = 1,35 \cdot 10^3 \text{ cgse}$; $d_s \approx 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ cgse}$; $k = 0,08$.

Отметим, что режим, предусматривающий $E_{эфф} = 0,5 \text{ кВ/см}$, является весьма форсированным и может быть осуществлен либо при очень низких частотах, либо в условиях интенсивного охлаждения. При этом эквивалентный пьезомодуль имеет такое же значение, как для поляризованной керамики BaTiO_3 , однако коэффициент электромеханической связи (а также коэффициент удельной чувствительности $d/\sqrt{\epsilon}$) в 3—4 раза ниже.

Эффекту изменения ϵ диэлектриков под давлением аналогичен магнитоупругий эффект (зависимость магнитной проницаемости μ от давления), который наиболее сильно выражен у никель-марганцевых ферритов НМ-2000, НМ-4000 и других [2]. Эти материалы могут применяться в магнитоупругих параметрических преобразователях. При высокой чувствительности они отличаются хорошей стабильностью свойств и сравнительно небольшим гистерезисом.

Вывод выражения для коэффициента электромеханической связи аналогичен (2).

Если активный элемент находится в магнитном поле H , то изменения индукции ΔB и магнитной энергии $W_{\text{магн}}$ обусловлены изменением μ при действии давления:

$$\begin{aligned} \Delta B &= H \Delta \mu; \\ W_{\text{магн}} &= \Delta B^2 / 8\pi \mu V; \quad W_y = 1/2 \xi^2 E_{ю} V; \\ k^2 &= \frac{W_{\text{магн}}}{W_y} = \frac{4\pi \mu}{E_{ю}} \left(\frac{\Delta \mu}{\xi \mu} \right)^2 \left(\frac{B}{4\pi \mu} \right)^2 = \frac{4\pi \mu a_s^2}{E_{ю}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Формула (3) совпадает с известным выражением k^2 для поляризованного магнестрикционного материала, если ввести эффективную магнестрикционную постоянную $a = \kappa H / 4\pi$, где $\kappa = \Delta \mu / \xi \mu$ — коэффициент тензочувствительности.

Магнитное поле H в преобразователе может быть как постоянным (создается с помощью ферритовых магнитов, вклеенных в магнитную цепь), так и переменным. Выбирая соотношения между величинами постоянной (B_0) и переменной (B_{\sim}) индукции, следует учитывать зависимости μ , κ и магнитных потерь от B_0 и B_{\sim} . Предельные значения k обусловлены тепловыделением, а также нелинейными искажениями и падением μ и κ в сильных переменных полях. Для феррита НМ-2000 допустима работа при $B_{\sim} = 1000 \text{ гс}$. При этом $\mu = 10^4$; $\kappa = 10^4$; $a = 10^2 \text{ дн/гс} \cdot \text{см}^2$; $k = 0,03$. Возможно увеличение k до 0,06 путем введения в магнитную цепь постоянных магнитов.

Если учесть, что у лучших составов магнестрикционных ферритов величины a и k равны соответственно $(2,5\text{--}3) \cdot 10^4 \text{ дн/гс} \cdot \text{см}^2$ и 0,4, то можно сделать вывод, что все рассмотренные до сих пор параметрические преобразователи по эффективности значительно уступают пьезоэлектрическим и магнестрикционным. Тем не менее большие значения коэффициента тензочувствительности феррита НМ-2000 дают основание полагать, что магнитоупругие преобразователи из этого материала могут с успехом применяться для измерения механических величин не очень малой амплитуды, особенно на частотах от нуля до нескольких герц, где применение магнестрикционных и пьезоэлектрических преобразователей затруднительно.

Параметрические преобразователи на основе зависимостей ϵ и μ от давления, в противоположность емкостным преобразователям, необратимы. Для зависимости ϵ от σ , например, термодинамически обратным

эффектом является зависимость пьезоэлектрической константы $e = -d\xi/dP$ от поляризации P . Действительно, нетрудно показать, что $d/d\sigma(4\pi/\epsilon) = de/dP$. В пьезоэлектрике этот нелинейный эффект приводит к появлению малых поправок в величинах пьезоэлектрических коэффициентов за счет влияния давления или сильного поля. Если $d_{ik} = 0$ и $e_{ik} = 0$ (как в неполяризованных керамических сегнетоэлектриках), то величины производных de/dP (а также $de/d\sigma$) все же могут отличаться от нуля. Тем не менее едва ли целесообразно создание параметрических преобразователей-излучателей, основанных на этом эффекте, поэтому приемники рассмотренных типов в линейном приближении можно считать необратимыми.

Перейдем к рассмотрению параметрических преобразователей с активным характером электрического импеданса. К ним относятся, в частности, проволочные тензодатчики. Для таких преобразователей, как уже отмечалось в [3], целесообразно сопоставлять входную упругую энергию W_y , необходимую для достижения заданной деформации, с выходной электрической активной мощностью N . Поэтому коэффициент электро-механической связи в случае синусоидального механического сигнала частоты f определим как отношение выходной электрической энергии за один период ($W_{эл} = N/f$) к величине W_y .

В проволочных тензодатчиках изменение электрического сопротивления R обусловлено геометрическими факторами и практически не связано с изменением параметров проволоки.

В режиме постоянства тока i , проходящего через датчик,

$$W_{эл} = \frac{(\Delta u)^2}{2Rf} = \frac{E^2 l^2 (\Delta R)^2}{2R^3 f}; \quad W_y = \frac{1}{2} \xi^2 E_{ю} S l;$$

$$k^2 = \frac{W_{эл}}{W_y} = \frac{E^2 \kappa^2}{f E_{ю} \rho} = \frac{\omega \gamma^2 E_{ю}}{f \rho}. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент электро-механической связи в этом случае оказывается зависящим от частоты. Здесь $\kappa = \frac{\Delta R}{\xi R} = \gamma E_{ю}$ — коэффициент тензочувствительности; ω — допустимая мощность рассеяния на единицу объема активного материала; ρ , S , l — удельное сопротивление, площадь сечения и эквивалентная длина проволоки; E — напряженность продольного электрического поля. У широко применяемого для тензодатчиков сплава «копель» $\rho = 0,48 \text{ ом} \cdot \text{см}$ (в 25 раз выше, чем у меди); $\kappa = 2,4$; если положить при идеальных условиях охлаждения плотность тока j , равной 10 а/мм^2 , то для датчика, имеющего $R = 100 \text{ ом}$, $l = 10 \text{ см}$, $S = 5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, получим: $E_{макс} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ в/см}$, $I = 5 \text{ ма}$, $k = 0,05$ (при $f = 1 \text{ гц}$).

Значительно более эффективны преобразователи, в которых модуляция R возникает не за счет изменения линейных размеров активного элемента, а вследствие изменения его электропроводности под действием механических напряжений (пьезорезистивного эффекта). Преимущества полупроводниковых пьезорезистивных датчиков по сравнению с проволочными с энергетической точки зрения заключаются, во-первых, в больших значениях тензочувствительности (для германия и кремния $\kappa = 100-150$) и, во-вторых, в меньшей электропроводности, вследствие чего при той же допустимой мощности рассеяния преобразователь может работать в условиях более высокой напряженности поля E . Тонкие полупроводниковые пленки могут наноситься на пассивированные металлические мембраны и поэтому допускают высокую плотность тока j .

Так, в выпускаемых в США датчиках типа «Микросенсор» (им аналогичны отечественные датчики типа «Нэтистор») используются крем-

ниевые пластинки, имеющие $S = (120 \times 12) \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$, $l = 1,7 \text{ см}$, $R = 120 \text{ ом}$ при $j \leq 20 \text{ а/мм}^2$, $\kappa = 100$, $E = 2,5 \text{ в/ом}$. По формуле (4), которая, очевидно, применима и для пьезорезистивных преобразователей, получаем $k = 16$ ($f = 1 \text{ гц}$).

Таким образом, преобразованная за 1 период электрическая энергия в 16^2 раз больше, чем накопленная в активном элементе упругая энергия. В этом заключается существенное отличие пьезорезистивных преобразователей от других рассмотренных до сих пор типов. Поскольку объем активного материала составляет лишь ничтожную часть объема колебательной системы, то отношение полезной электрической энергии (даже без учета потерь при согласовании) к механической энергии, накопленной в колебательной системе, остается все же малым.

Если увеличить объем активного материала в преобразователе без увеличения коэффициента механической трансформации, то или внутреннее сопротивление преобразователя, или потребляемый ток оказывается слишком большим. Поэтому попытка создать микрофон на основе однородного полупроводникового пьезорезистивного элемента [4] оказалась пока малоэффективной. Необходимо увеличить k^2 не менее чем на 2—3 порядка, чтобы можно было создать электроакустический приемник на полупроводниковом элементе с удовлетворительными эксплуатационными характеристиками. Такие возможности появляются лишь в полупроводниковых преобразователях, содержащих электронно-дырочные переходы (в пьезодиодах и пьезотранзисторах), при весьма высокой концентрации механических напряжений [5, 6].

Все рассмотренные выше типы параметрических преобразователей могут применяться в различных областях измерительной техники, а также (в некоторых специальных случаях) в электроакустике. Единственный метод рассмотрения этих преобразователей с введением универсального параметра — коэффициента электромеханической связи — облегчает сравнение различных типов параметрических и генераторных преобразователей и определение возможных областей их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Н. Вербицкая, Л. Н. Сыркин, А. М. Эльгард. Влияние давления и постоянного электрического поля на нелинейные свойства варикондов.— Изв. АН СССР, серия физ., 1965, т. 29, № 11.
2. Л. И. Иванова, Л. Н. Сыркин, А. М. Эльгард. Влияние магнитной текстуры на магнитоупругие свойства высокопроницаемых и магнитострикционных ферритов.— Тезисы докладов совещания по физике ферро- и антиферромагнетизма. Секция А-6. Свердловск, 1965.
3. L. V. Wilner. Sensitivity Comparison of Transduction Mechanistic.— Rev. Sci Instr., 1965, v. 36, № 5.
4. F. P. Burns. Piezoresistive Semiconductor Microphone.— I. A. S. A., 1957, v. 29, № 2.
5. M. E. Sikorski. Transistor Microphones.— Journ. of the Audio Eng. Soc., 1965, v. 13, № 3.
6. O. Brunnert, R. Karmann, P. Lohse. Über ein Mikrophon mit druckgesteuerten pn Übergang.— Nachrichtentechn. Zeitschrift, 1967, Bd. 2.

Поступила в редакцию
18 сентября 1967 г.