Физика горения и взрыва

№ 2
1993 г.

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 53.082.73 + 531.787.913

М. Е. Топчиян

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

В связи с публикацией в журнале ФГВ № 3 за 1991 г. статьи А. Г. Лямина, А. В. Пинаева и А. С. Лебедева «Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений», в которой авторы привели без серьезного физического объяснения довольно неожиданные, хотя и абсолютно надежные данные исследования влияния последовательной емкости на качество преобразования сигнала датчиком давления, считаю полезным для дела проанализировать описанные явления и объяснить результаты, опубликованные в этой статье.

Речь идет о влиянии емкости C_1 (см. схему на рис. 3 упомянутой работы) на форму и воспроизводимость преобразованного сигнала.

До последнего времени, работая с датчиками давлений на основе сегнетоэлектрической пьезокерамики, экспериментаторы мало обращали внимание на воздействие на диэлектрик поля свободных зарядов, наведенных на обкладках датчика. В этом не было необходимости, пока датчики использовались в диапазоне давлений до 10—50 атм. Чувствительность ненагруженного датчика составляет обычно несколько вольт на атмосферу, напряжение на нем не превышает нескольких десятков вольт, индукция наведенных свободных зарядов невелика и не приводит к возникновению нелинейных явлений и релаксации.

При попытках измерять давления до 100 атм и более искажения сигнала уже замечались. Часть экспериментаторов устраивало качество преобразования, другие считали, что причина искажений кроется в начинающемся разрушении кристалла, и переходили к использованию турмалина или кварца, которые обладают более низкой чувствительностью.

Как показали исследования авторов обсуждаемой статьи, искажения сигналов связаны с мощными полями, возникающими при появлении значительных свободных зарядов на обкладках датчика, который в традиционных схемах работает практически в режиме короткого замыкания, поскольку обычно нагружен на бо́льшую емкость C_2, подключаемую параллельно входу усилителя, что обеспечивает достаточно большую постоянную времени, необходимую для неискаженной записи длительных сигналов. На первый взгляд предложение авторов парадоксально, так как подключая малую (порядка единиц пикофарад) последовательную емкость C_1 они ничего, кроме уменьшения сигнала (при наличии емкости C_2) либо его дифференцирования (и, как следствие, искажения формы) получить не могут! Рассмотрим, однако, проблему внимательней.

Анализ влияния C_1 может быть проведен следующим образом.

1. Считаем, что $C_2 \gg C_1$. Тогда цепь $C_1 - C_д$ работает практически в режиме короткого замыкания, поэтому разности потенциалов на $C_д$ и C_1 равны по величине и противоположны по знаку:

$$U_д = -U_1 \quad \text{или} \quad E_д d_д = -E_1 d_1, \tag{1}$$

где $d_д$ и d_1 — расстояние между обкладками $C_д$ и C_1.

2. Свободные заряды, наведенные па пластинах всех трех конденсаторов, равны но величине, поэтому

$$\sigma_1 S_1 = \sigma_д S_д = \sigma_2 S_2, \tag{2}$$

где σ и S — соответствующие поверхностные плотности свободных зарядов и площади пластин.

3. Поле $E_д$ в диэлектрике датчика определяется как полем свободных зарядов, так и поляризацией P_n, возникающей вследствие пьезоэффекта. Эти поля имеют противоположное направление:

$$E_д = 4\pi\sigma_д/\varepsilon_д - 4\pi P_n/\varepsilon_д. \tag{3}$$

4. Напряженность поля в C_1 связана с поверхностной плотностью σ_1 соотношением $E_1 = 4\pi\sigma_1/\varepsilon_д$. Если использовать формулу для плоского конденсатора $C_1 = \varepsilon_1 S_1/4\pi d_1$, получим

$$E_1 = \frac{\sigma_1 S_1}{C_1 d_1} = \frac{\sigma_д S_д}{C_1 d_1}. \tag{4}$$

5. Используя (1)—(4), найдем формулы для вычисления E_1 и $E_д$ в зависимости от емкостей, проницаемостей и площадей пластин

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{C_1 S_д}{\varepsilon_1 S_1 (C_д + C_1)} 4\pi P_n, \\ E_д &= -\frac{C_д}{\varepsilon_д (C_д + C_1)} 4\pi P_n. \end{aligned} \tag{5}$$

6. Полная поляризация диэлектрика P складывается из поляризации P_n и поляризации $P' = \frac{\varepsilon_д - 1}{4\pi} E_д$, создаваемой свободными зарядами:

$$P = P_n + P' = \frac{\varepsilon_д C_1 + C_д}{\varepsilon_д (C_1 + C_д)} P_n. \tag{6}$$

Анализ формул (5), (6) показывает, что при уменьшении C_1, когда $C_1 \ll C_д$, предельные значения полей и поляризации отвечают соотношениям

$$E_1 = S_д C_1/\varepsilon_1 S_1 C_д \cdot 4\pi P_n, \ E_д = -4\pi P_n/\varepsilon_д, \ P = P_n/\varepsilon_д.$$

При увеличении C_1, когда $C_д \ll C_1$

$$E_1 = S_д/\varepsilon_1 S_1 \cdot 4\pi P_n, \ E_д = -C_д/\varepsilon_д C_1 \cdot 4\pi P_n, \ P = P_n.$$

Если в качестве пьезоэлемента применяется сегнетоэлектрик, величина $\varepsilon_д$ лежит в диапазоне от ста до нескольких тысяч единиц. Легко видеть, что в этом случае поляризация для малых C_1 будет в сотни раз меньше, чем для больших значений. Индукция поля свободных зарядов меняется от $D = \frac{\varepsilon_д}{\varepsilon_1} \frac{S_д}{S_1} \frac{C_1}{C_д} 4\pi P_n$ (близкого к нулю, так как $C_1 \ll C_д$) до $D = \frac{\varepsilon_д S_д}{\varepsilon_1 S_1} 4\pi P_n$, т. е. до величины в $C_д/C_1$ раз большей.

Очевидно, что возникающие во втором случае при больших давлениях мощные поля свободных зарядов могут приводить к гистерезисным, релаксационным и усталостным явлениям, искажающим форму преобразованного сигнала.

Интересно, что аналогичные результаты, рассуждения и выводы прямо или косвенно изложены в книге У. Кэди «Пьезоэлектричество и его практические применения» (М.: ИЛ, 1949). В § 110 решается задача о влиянии воздушного зазора, которая может рассматриваться как частный случай проведенного здесь анализа при $\varepsilon_1 = 1$ и $S_д = S_1$, изложенный в терминах размеров зазора $d_1 = w$, $d_д = e$, а не в терминах емкостей. В §§ 501, 502 (стр. 614—616) приведены рассуждения о влиянии внешних цепей на работу пьезодатчика.

Таким образом, результаты, касающиеся влияния емкости C_1, полученные в статье Г. А. Лямина, А. В. Пинаева и А. С. Лебедева, имеют точное теоретическое объяснение. Предложенная в этой работе схема подключения датчиков в диапазоне высоких давлений обладает преимуществами и является, по-видимому, единственно правильной при использовании сегнетоэлектриков на больших давлениях, так как не искажает преобразуемый сигнал. Снижение же чувствительности с лихвой покрывается большой величиной сигнала, который на ненагруженном датчике в этих условиях достигает тысяч вольт.

г. Новосибирск *Поступила в редакцию 11/XI 1992*

УДК 624.131 + 532.215 + 534.22

В. Ф. Нестеренко

ПРИМЕРЫ «ЗВУКОВОГО ВАКУУМА»

В работах [1, 2] введено понятие «звуковой вакуум», которое используется для выделения класса дискретных сред с нулевой или пренебрежимо малой длинноволновой скоростью звука, где неприменимо классическое волновое уравнение. Невозможно в этом случае и использование базирующихся на нем уравнений типа Буссинеска или Кортевега-де Вриза. Для описания возмущений в таких средах в [1—4] предложено уравнение, включающее отмеченные традиционные подходы, которое позволяет выявить качественно новые коллективные элементарные возбуждения.

Первым примером такой среды была цепочка гранул, взаимодействующих по существенно нелинейному закону Герца [3]. В этой системе, в частности, обнаружены солитоны нового типа, являющиеся для нее основным несущим тоном («нестоны»). Их свойства детально изучены численными аналитическими методами и экспериментально [3].

Хорошо известным примером существенно нелинейного процесса служат поперечные колебания ненатянутой нити [5], так как в этом случае отсутствует линейный по смещению член во возвращающей силе, аналогично случаю цепочки гранул. Поэтому данное свойство естественно использовать для построения одного из практически важных примеров «звукового вакуума» и получения численных оценок скоростей распространения возмущений.

Рассмотрим модель в виде системы частиц с одинаковыми массами m, закрепленными на невесомой ненатянутой нити с площадью сечения S, модулем Юнга E, на равных расстояниях a_0 друг от друга. Предполагается, что натяжение нити T изменяется линейно с изменением ее длины

$$T = ES\frac{(a - a_0)}{a_0}.$$

Считаем, что основное движение масс происходит в направлении, перпендикулярном к начальному положению нити, и описывается смещением u_i. Тогда в соответствующем приближении получаем уравнение движения для i-й частицы

$$\ddot{u}_i = A\{(u_{i-1} - u_i)^3 - (u_i - u_{i+1})^3\}, \quad A = \frac{ES}{2ma_0^2}. \qquad (1)$$