УДК 621.395.61: 621.319.2 (076)

Н.С.ПЩЕЛКО
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Обсуждены методологические проблемы расчета электретных преобразователей. Показано, что капсюль электретного преобразователя является очень сложной для моделирования системой. Поэтому необходимо сделать ряд упрощающих допущений при моделировании. Например, считается, что мембрана имеет куполообразную форму. Поскольку амплитуда колебаний мембраны мала, рассматриваемый объект можно изучать в линейном приближении. Предложена методика расчета чувствительности электретного микрофона в зависимости от частоты колебаний, размеров преобразователя, натяжения и заряда электрета и т.д. Учитывается прогиб мембраны под действием электростатических сил. Показано, что использование предлагаемой методики позволяет получить сравнительно простые аналитические выражения. Использование данной методики позволяет разрабатывать способы неразрушающего контроля электретных микрофонов, оптимизировать их конструкции, использовать проектирование электретных преобразователей в учебном процессе и др.

Methodological problems of electret transducer calculation are discussed. An electret transducer insert is shown to be too a complicated object for simulation. So some simplifying assumptions should be made in the model. For instance transducer's membrane is considered to have a dome form. As soon as the amplitude of membrane oscillations is small the considered object is studed in a linear approximation. Procedure for the calculation of electret microphone sensitivity as a function of oscillation frequency, transducer geometry, tension and charge of an electret, etc, is suggested. Membrane deflection under the influence of electrostatic forces is taken into account. The procedure is shown to result in relatively simple analytically tractable solution. The procedure application allows to design methods of non-destructive control for electret microphones, to optimize electret microphones design, to use electret transducer design in student teaching process, etc.

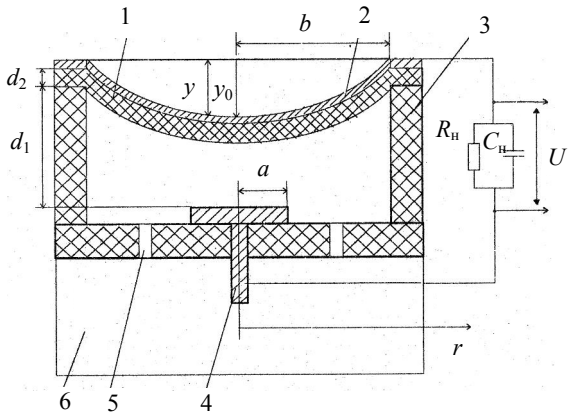
Электреты – диэлектрики, способные длительное время сохранять наэлектризованное состояние, – в настоящее время находят все большее применение в различных областях техники. Однако основным применением электретов остаются электроакустические преобразователи (ЭП) мембранного типа [1] – электретные микрофоны (ЭМ) и звуковые излучатели. Так, например, в настоящее время более 90 % выпускаемых в мире микрофонов являются электретными. Это связано с дешевизной и высоким качеством ЭМ. Конструкция ЭМ показана на рисунке.

Принцип действия ЭМ основан на изменении под действием внешнего акустического давления положения мембраны и, следовательно, напряженности электрического поля в рабочем воздушном зазоре d_1. Вследствие этого появляется ток смещения, создающий падение напряжения U на выходе ЭМ. К выходу ЭМ подключают предусилитель – полевой транзистор с входным сопротивлением $R_н$ и емкостью $C_н$. Поскольку полевой транзистор является неотъемлемой частью ЭМ, в настоящее время предпринимаются интенсивные попытки создания объединенной конструкции механической части ЭМ и полевого транзистора, формируемых в единой кремниевой технологии, используемой в микроэлектронике [8]. В этом случае в качестве электрета перспективно использование гидрофобизированного электризованного слоя диоксида кремния на поверхности кремниевой пластины [3]. В настоящее время эта задача окончательно не решена. Однако бурное развитие MEMS-

технологий (microelectromechanical systems) – наиболее интенсивно развивающегося сегодня направления микроэлектроники – позволяет ожидать еще более широкого внедрения ЭП в устройствах современной электроники.

Именно поэтому представляется актуальной задача расчета ЭП (в случае ЭМ – расчета чувствительности и ее амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

При решении этой задачи, однако, возникают существенные методические трудности, связанные со сложностью математического описания происходящих в ЭП физических процессов и их многообразием: ЭП представляет собой сложный для моделирования объект, в котором происходят одновременно механические (колебания мембраны), электрические (появление неравновесных зарядов и токов), термодинамические (сжатие воздуха в подмембранном объеме и его дросселирование через акустические отверстия в противоэлектроде) и другие явления. Для их описания приходится использовать, как правило, дифференциальные уравнения. Например, колебания мембраны описываются волновым уравнением, содержащим частные производные как по координате r, так и по времени t, а также силовой компонент $p(r, t)$ – давление, оказываемое на мембрану внешними силами и пондеромоторным действием поля электрета (в результате действия поля электрета мембрана приобретает статический прогиб в центре y_0, см. рисунок). Учитывая сложный явный вид $p(r, t)$, аналитическое решение рассматриваемого уравнения в данном случае невозможно. Попытки аналитического описания колебаний искривленных мембран даже в более простых случаях приводят к сложным уравнениям, которые, как показывает практика, остаются невостребованными инженерами и технологами. Аналогичные проблемы появляются и при описании электрической и термодинамической частей ЭП. Кроме того, возникающие уравнения должны решаться совместно с уравнением для колебаний мембраны. Поэтому даже при использовании вычислительной техники в расчетах ЭП возникают серьезные проблемы, связанные с трудностью алгоритмизации численных методов расчета. В связи с этим такая методология решения проблемы представляется тупиковой, так как, если удастся разработать соответствующую программу расчета, она, скорее всего, будет пригодна для частных случаев с ограниченным применением. Поэтому в данной ситуации уместно использовать один из методологических принципов физики – принцип простоты, и учесть, что при условии незначительного отклонения от равновесия сложную систему можно считать квазилинейной (амплитуда колебаний мембраны ЭМ обычно составляет десятые доли микрометра, что существенно меньше величины зазора ($d_1 = 10 \div 100$ мкм) и статического прогиба мембраны). Укажем ряд упрощающих допущений, используемых при реализации предлагаемой методики.



Капсюль электретного микрофона
1 – полимерный пленочный электрет, выполняющий также функции подвижной мембраны; 2 – слой металлизации; 3 – диэлектрическая прокладка для обеспечения воздушного зазора; 4 – противоэлектрод; 5 – отверстия для сообщения с воздушной полостью; 6 – воздушная полость

1. Предположим, что мембрана в процессе колебаний имеет куполообразную форму, описываемую функцией

$$y = y_0\left(1 - \frac{r^2}{b^2}\right).$$

2. Примем элементы упругости и массы мембраны не распределенными по ее площади, а сосредоточенными в центре мембраны, уподобив тем самым колебания мем-

браны хорошо известным колебаниям груза на пружине. Соответствующие выражения для эффективных масс, сил, коэффициентов упругости получаются из условия равенства работ, совершаемых эффективными и реальными силами.

3. Учтем, что вырабатываемый ЭМ сигнал U обычно составляет 1-100 мВ, что много меньше используемого поверхностного потенциала электрета $U_э = 10 \div 1000$ В.

4. При расчете тока смещения дифференцированием напряженности поля по времени учтем малость амплитуды колебаний по сравнению с d_1.

Расчеты, выполненные при указанных допущениях [5, 8], позволяют получить аналитические выражения для расчета чувствительности ЭМ, в том числе его АЧХ. Так, в случае ЭМ с натянутой мембраной его чувствительность S на холостом ходу в зависимости от циклической частоты ω

$$S(\omega) = 3\varepsilon_2 U_э \left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right) \Bigg/ \left\{ 2\omega_0^2 \rho_V d_2 \times \right.$$

$$\left. \times \left[A - \varepsilon_2 y_0 \left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right) \right] \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \right\},$$

где ω_0 – собственная циклическая частота колебаний мембраны; ξ – коэффициент затухания, $A = \varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1$; ε_1, d_1 и ε_2, d_2 – соответственно относительные диэлектрические проницаемости и толщина воздушного зазора и диэлектрика-электрета.

Статический прогиб y_0 может быть определен из уравнения

$$4\varepsilon_2^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) y_0^3 - 4\varepsilon_2 A \left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right) y_0^2 +$$

$$+ 4A^2 y_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 U_э^2 a^2}{2\tau} = 0.$$

Таким образом, простой вид полученных выражений позволяет количественно выявить влияние параметров электрической нагрузки ($R_н$, $C_н$) ЭМ, оптимизировать их конструкции [6], разрабатывать способы неразрушающего контроля параметров капсюлей ЭМ [4, 10], прогнозировать изменение чувствительности ЭМ под влиянием дрейфа внутренних и внешних факторов [9], внедрить изучение [7], в том числе, проектирование [2] ЭМ, в учебный процесс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ганенков Н.А.* Электретные электромеханические преобразователи / Н.А.Ганенков, Н.С.Пщелко // Радиоэлектроника в СПбГЭТУ. СПб, 1996. Вып.2. С.121-126.

2. *Закржевский В.И.* Методические указания к курсовым проектам по дисциплине «Расчет и конструирование полупроводниковых и диэлектрических структур» / В.И.Закржевский, О.И.Колдунов, Н.С.Пщелко; Электротехнический университет. СПб, 1992. 20 с.

3. Модификация термостойких фотолаков для новых областей применения / Н.В.Климова, Г.К.Лебедева, Л.И.Рудая, Т.А.Юрре, И.М.Соколова, Н.С.Пщелко // Петербургский журнал электроники. СПб, 2002. № 3. С.33-37.

4. Патент 2132116 РФ. Способ определения качества электретных электроакустических преобразователей и устройство для его реализации / Ф.И.Баталов, Н.С.Пщелко, А.С.Ястребов (РФ). 1999.

5. *Пщелко Н.С.* Методика расчета электретных приемных электроакустических преобразователей / Н.С.Пщелко, В.Н.Таиров // Акустический журнал. М., 1988. Т.34. № 4. С.706-710.

6. *Пщелко Н.С.* Оптимизация параметров электретных микрофонов / Н.С.Пщелко, Д.А.Козодаев // Известия Электротехнического университета. СПб, 1997. Вып.504. С.87-92.

7. Теория и расчет электромеханических преобразователей на активных диэлектриках: Учеб. пособие / Н.А.Ганенков, В.И.Закржевский, О.И.Колдунов, Н.С.Пщелко; Электротехнический университет. СПб, 1994. 43 с.

8. *Kozodaev D.A.* Analysis of Electert Sub-Miniature Microphones / D.A.Kozodaev, N.S.Pshchelko, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE-10. Athens, 1999. P.973-978.

9. *Pshchelko N.S.* Sensitivity Stability of Electret Transducers / N.S.Pshchelko, V.N.Tairov, A.R.Ozols // Proc.ISE-7. Berlin, 1991. P.935-940.

10. *Pshchelko N.S.* C-V – Testing of Electeret Transducers / N.S.Pshchelko, I.M.Sokolova, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE-8. Paris, 1994. P.1028-1033.