УДК 621.395.61: 621.319.2 (076)

Н.С.ПЩЕЛКО, *канд. техн. наук, доцент, nikolsp@mail.ru*
В.В.БУЕВИЧ, *студент, ассистент профессора, vlad_imir08@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

N.S.PSHCHELKO, *PhD in eng. sc., associate professor, nikolsp@mail.ru*
V.V.BUEVICH, *student, professor's assistant, vlad_imir08@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЕМКОСТНЫХ СЕНСОРОВ И АКТИВАТОРОВ

Рассмотрены некоторые конструкции емкостных сенсоров и активаторов, работа которых основана на использовании электрического поля. Показано, что эти конструкции относительно дешевы в изготовлении, но при этом обладают хорошими техническими характеристиками. Приведено теоретическое обоснование возможности использования электростатических сил для компенсации разности давлений в соответствующем измерительном устройстве. Рассмотрена методика определения параметров капсюля конденсаторной структуры. Методика позволяет по одной операции снятия вольт-фарадной характеристики определять целый комплекс важнейших параметров капсюля: рабочий воздушный зазор, прогиб мембраны, электретный поверхностный потенциал и натяжение мембраны. Зная аналитическое выражение для емкости капсюля в зависимости от указанных параметров и измеряя его вольт-фарадную характеристику, можно, решая соответствующую систему уравнений, определить искомые параметры. Рассмотренная процедура является неразрушающим методом контроля.

Ключевые слова: электрическое поле, емкостные преобразователи, неразрушающий контроль.

USING OF ELECTRIC FIELD FOR MANUFACTURING AND NONDESTRUCTIVE TESTING OF A CAPACITOR SENSORS AND ACTUATORS

Some designs of capacitor sensors and actuators which work is based on electric field use are considered. It is shown that these designs are rather cheap in manufacturing, but thus possess good technical characteristics. The theoretical substantiation of possibility of electrostatic forces use for balancing of a pressure difference in the corresponding measuring device is adduced. Procedure for definition of parameters of a condenser structure cap is considered. The procedure allows by means of one operation – volt-capacitance characteristic measuring – to define the whole complex of the major parameters of a cap-size of a working air gap, a membrane deflection, surface electret potential and a membrane tension. Analytical expression for capacitance of a cap depending on the specified parameters and measuring of its volt-capacitance characteristic allow to define these parameters by solving corresponding system of equations. The procedure considered in the present work is a method of a not-destroying control.

Key words: electric field, capacitor transducers, non-destructive control.

Конденсаторные структуры с подвижными обкладками – чувствительные элементы (сенсоры) и исполнительные устройства (активаторы) – получили широкое распространение в технике. Это связано с высокой чувствительностью соответствующих устройств, сочетающейся с их относительно низкой стоимостью. В качестве примера емкостного датчика на рис.1 показан капсюль электретного микрофона. Электреты (диэлектрики, способные длительно сохранять наэлектризованное состояние) находят все

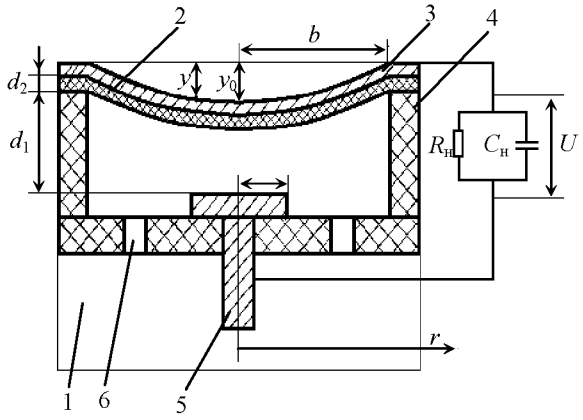


Рис.1. Капсюль электретного микрофона:

a – радиус противоэлектрода; *b* – радиус мембраны; d_1 – толщина прокладки, обеспечивающей воздушный зазор между мембраной и противоэлектродом; d_2 – толщина мембраны (электрета); y_0 – прогиб мембраны в ее центре; *y* – прогиб мембраны на расстоянии *r* от центра мембраны; 1 – воздушная полость; 2 – полимерный пленочный электрет, выполняющий также функции подвижной мембраны; 3 – слой металлизации; 4 – диэлектрическая прокладка для обеспечения воздушного зазора; 5 – противоэлектрод; 6 – отверстия для сообщения с воздушной полостью

большее применение в различных областях техники. Основным применением электретов, однако, остаются электретные преобразователи (ЭП) мембранного типа [1-8] – электретные микрофоны (ЭМ) и звуковые излучатели. Так, например, большинство выпускаемых в мире микрофонов являются электретными. Это связано с дешевизной и высоким качеством ЭМ. Принцип действия ЭМ основан на изменении под действием внешнего акустического давления положения мембраны и, следовательно, напряженности электрического поля в рабочем воздушном зазоре d_1. При этом появляется ток смещения, создающий падение напряжения *U* на выходе ЭМ.

К выходу ЭМ подключают предусилитель – полевой транзистор с входным сопротивлением $R_н$ и емкостью $C_н$, играющими роль электрической нагрузки. Поскольку полевой транзистор является неотъемлемой частью ЭМ, предпринимаются интенсивные попытки создать объединенную конструкцию механической части ЭМ и полевого транзистора, формируемую 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.

Электрическое поле, получаемое в том числе и с использованием электретов, можно применять и в исполнительных устройствах – активаторах (например, в электростатических звуковых излучателях). На рис.2 в качестве примера устройства, в котором электрическое поле активирует (перемещает) мембрану, показан дифференциальный датчик перепада давлений.

Принцип его работы основан на изменении положения мембраны под действием перепада пневматических давлений и, как следствие, изменении значений емкостей, образуемых мембраной с электродами, между которыми она находится. Таким образом, мембрана играет роль одной из обкладок конденсатора. Показанная на рис.2 конструкция позволяет фиксировать очень незначительные изменения давления (единицы паскаля) на фоне больших значений давления (например, сотни мегапаскалей). Это достигается благодаря использованию пондеромоторных сил электрического поля и применению принципа обратной связи: допустим, давления p_1 и p_2 примерно составляют 100 МПа, но p_1 меньше p_2 на 1 Па. Тогда под действием разности давлений статически почти не напряженная (вялая) мембрана начнет перемещаться вправо (рис.2), что приведет к изменению емкости, образуемой мембраной 8 с правым электродом 4. Регистрируемое изменение емкости преобразуется специальным электронным устройством в электрическое напряжение, подаваемое на левый электрод 4. Возникающее в левой половине конструкции электрическое поле приведет к появлению пондеромоторных сил, смещающих мембрану влево до тех пор, пока емкость его правой половины ни примет исходное значение. Таким образом, мембрана будет оставаться практически неподвижной и в ней не будут возникать упругие

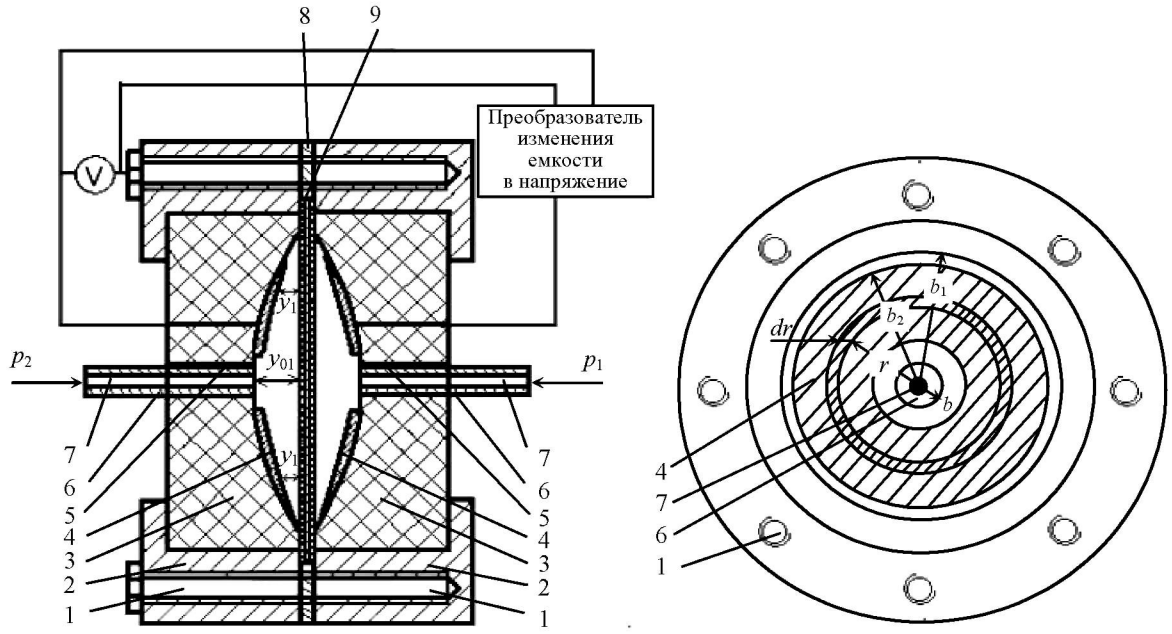


Рис.2. Емкостной датчик перепада давлений с силовой компенсацией:

y_{01} – расстояние между центром мембраны и тянущим противоэлектродом; y_1 – расстояние между мембраной и тянущим противоэлектродом на расстоянии r от ее центра; b – радиус мембраны; b_1 – внутренний радиус тянущего противоэлектрода; b_2 – внешний радиус тянущего противоэлектрода; r – текущая координата, отсчитываемая от центра мембраны; dr – приращение текущей координаты; 1– стягивающие шпильки; 2 – металлические полукольца, скрепляющие левую и правую половины датчика, а также осуществляющие гальванический контакт с мембраной; 3 – диэлектрические основания; 4 – электроды (напыленный металлический слой); 5 – герметизирущий материал; 6 – пневматические вводы; 7 – отверстия в пневматических вводах; 8 – металлическая мембрана (алюминий); 9 – диэлектрический слой (оксид алюминия)

силы. Это позволяет предположить, что данная конструкция будет обладать высокой надежностью, так как изменение параметров мембраны не должно существенно сказываться на ее работе. Об измеряемой разности давлений можно судить по показаниям вольтметра.

Расчет пондеромоторного давления, компенсирующего разность пневматических давлений p_1 и p_2, для показанной на рис. 2 конструкции приводит к выражению

$$p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 U^2 (b_2^2 - b_1^2)}{2b^2 (A - Bb_2^2)(A - Bb_1^2)},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха, $\varepsilon_1 = 1$; ε_2 – диэлектрическая проницаемость слоя оксида алюминия на поверхности мембраны; U – электрическое напряжение, прикладываемое к левой части структуры, показанной на рис.2; $A = \varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 y_{01}$; $B = \varepsilon_2 y_{01} b^{-2}$. Расчеты показывают, что при разумных размерах конструкции возникающее пондеромоторное давление составляет единицы-тысячи паскалей при напряжении единицы-сотни вольт. Это позволяет на основе использования электрического поля управлять смещением мембраны, а фактически, поддерживать ее в рассматриваемой конструкции в недеформированном состоянии.

Для экспериментальной отработки конструкций емкостных структур необходима методика неразрушающего контроля их параметров – определение важнейших параметров капсюля конденсаторного преобразователя: толщины электрета или диэлектрического слоя d_2, зазора d_1 (см. рис.1) или y_0 (см. рис.2), прогиба мембраны, электретного поверхностного потенциала $U_э$ и натяжения мембраны τ. При этом желательно производить измерения параметров мембраны непосредственно в капсюле (в полусборке). Предлагаемая ниже методика позволяет это сделать.

Суть метода заключается в следующем: под действием внешнего электрического поля, создаваемого электретом и электриче-

ским напряжением U, которое может быть приложено к преобразователю, его мембрана прогибается (из-за наличия электростатических сил) так, что ее прогиб в центре составляет некоторую величину y_0 (см. рис. 1). Очевидно, в зависимости от значения и полярности U, а также от значений указанных выше параметров, значения y_0 будут различны. Следовательно, электрические емкости C преобразователя при различных значениях U тоже будут различны. Таким образом, зная аналитическое выражение для C в зависимости от τ, $U_э$, U, d_1, d_2 и измеряя $C(U)$, можно, решая соответствующую систему уравнений, определить искомые параметры. Более подробное использование этой методики описано в работах [4, 9, 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ганенков Н.А.* Электретные электромеханические преобразователи / Н.А.Ганенков, Н.С.Пщелко // Радиоэлектроника в СПбГЭТУ. 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; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 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. 2002. № 3. С.33-37.

4. Пат. № 2132116 РФ Н 04 R 29/00. Способ определения качества электретных и электроакустических преобразователей и устройство для его реализации / Ф.И.Баталов, Н.С.Пщелко, А.С.Ястребов. Опубл. 27.05.99. Бюл. № 17. Ч.2.

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

6. *Пщелко Н.С.* Оптимизация параметров электретных микрофонов / Н.С.Пщелко, Д.А.Козодаев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 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; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 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.

REFERENCES

1. *Ganenkov N.A., Pshchelk N.S.* Electret Electromechanical Transducers / Radio electronics in Saint Petersburg Electrotechnical Institute «LETI». Saint Petersburg, 1996. Issue.2. P.121-126.

2. Zakrzhevsky V.I., Koldunov O.I, Pshchelko N.S. Methodical Instructions for Academic Year Projects on Discipline «Calculation and design of semiconductor and dielectric structures» / Electrotechnical Institute «LETI», Saint Petersburg, 1992. 20 p.

3. *Klimova N.V., Lebedeva G.K., Rudaja L.I., Jurre T.A., Sokolova I.M., Pshchelko N.S.* Modification of Heat-resistant Photovarnishes for New Applications / The Petersburg magazine of electronics. 2002. №3. P.33-37.

4. RF patent № 2132116 H 04 R 29/00. Method of determining the quality of electret and electroacoustic converters and devices for its reducing to practice / F.I.Batalov, N.S.Pschelko, A.S.Yastrebov. Pubd. 27.05.99. Bul No 17. Part 2.

5. *Pshchelko N.S., Tairov V.N.* Procedure For the Calculation of Electret Receiving Electroacoustic Transducers / Sov. Phys. Acoust. 1988. V.34, № 4. P. 706-710.

6. *Pshchelko N.S., Kozodaev D.A.* Optimisation of Eltctret Microphones Parametres // News of Electrotechnical Institute «LETI». 1997, Issue 504. P. 87-92.

7. *Ganenkov N.A., Zakrzhevsky V.I., Koldunov O.I., Pshchelko N.S.* Theory and Calculation of Electromechanical Transducers on Active Dielectrics: The manual / Electrotechnical Institute «LETI», Saint Petersburg, 1994. 43 p.

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

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

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

Научный руководитель канд. техн. наук, доцент *Н.С.Пщелко*