

**Н.С. ПЩЕЛКО, канд. техн. наук, доцент, nikolsp@mail.ru**

*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

**N.S. PSHCHELKO, PhD in eng. sc., associate professor, nikolsp@mail.ru**

*Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)*

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАПСЮЛЕЙ КОНДЕНСАТОРНЫХ СТРУКТУР С ПОДВИЖНЫМИ ОБКЛАДКАМИ**

Рассмотрена процедура определения параметров капсюля конденсаторной структуры. Методика позволяет по одной операции снятия вольт-фарадной характеристики определять целый комплекс важнейших параметров капсюля: величину рабочего воздушного зазора, прогиб мембранны, электретный поверхностный потенциал и натяжение мембранны. Получены выражения, связывающие емкость капсюля, с указанными параметрами. 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 в настоящей работе процедура является неразрушающим методом контроля.

**Ключевые слова:** конденсаторная структура, электрет, вольт-фарадная характеристика, неразрушающий контроль.

## **PROCEDURE FOR DETERMINATION OF PARAMETERS OF A CONDESING STRUCTURES WITH A MOVABLE CAPACITOR PLATES**

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. The expressions for capacitance of a condenser structure cap as a function of specified parameters are obtained. 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 not-destroying quality monitoring method.

**Key words:** condenser structure, electret, volt-capacitance characteristic, non-destructive control.

В настоящее время конденсаторные структуры с подвижными обкладками (КСПО) получили широкое распространение в технике как в виде чувствительных элементов (сенсоров), так и в виде исполнительных устройств (активаторов). Это связано с высокой чувствительностью соответствующих устройств, соче-

тающейся с их относительно низкой стоимостью.

В качестве примера КСПО на рис.1 показан датчик перепада давлений. Принцип его работы основан на изменении положения мембранны под действием перепада давлений  $p_1$  и  $p_2$  и, как следствие, изменения емкостей, образуемых мембранны с

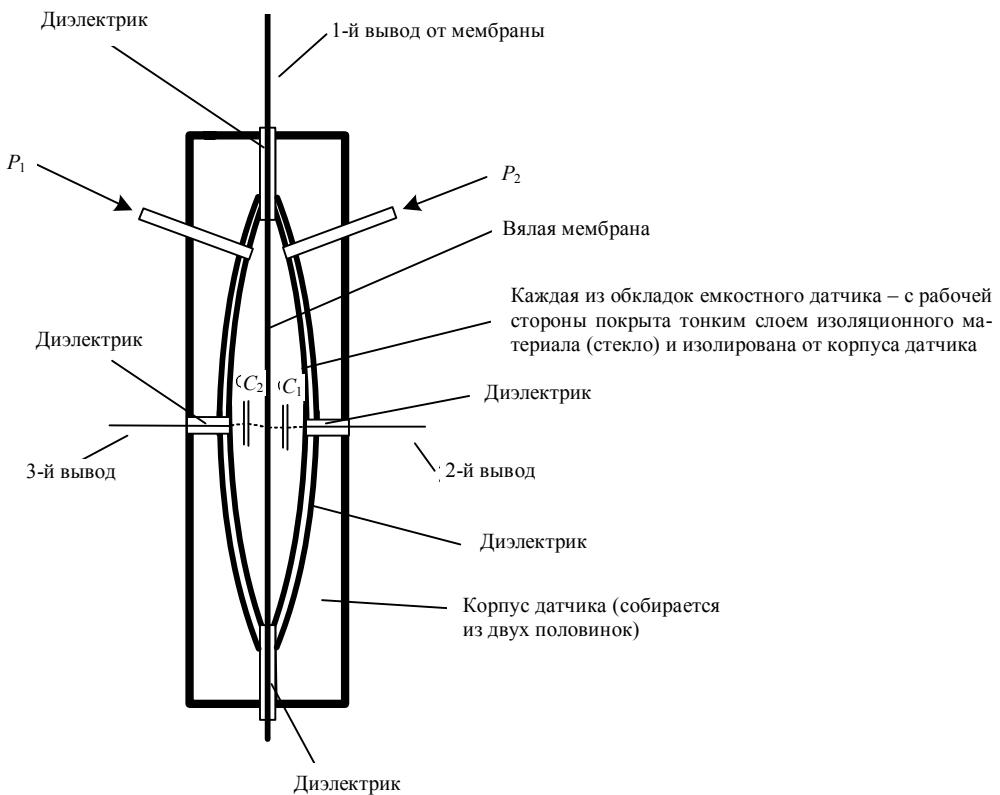


Рис.1. Датчик перепада давлений емкостного типа

электродами, между которыми она находится. Таким образом, мембрана играет роль одной из обкладок конденсатора. При большой перегрузке вялая мембрана ложится на одну из обкладок емкостного датчика.

Одной из разновидностей конденсаторных структур с подвижными обкладками являются электретные конденсаторные структуры. Электреты (диэлектрики, способные длительно сохранять наэлектризованное состояние) в настоящее время находят все большее применение в различных областях техники. Основным применением электретов, однако, остаются электроакустические преобразователи мембранных типа – электретные микрофоны (ЭМ) [1] и звуковые излучатели. В настоящее время более 90 % выпускаемых в мире микрофонов являются электретными. Это связано с дешевизной и высоким качеством ЭМ (рис.2).

Принцип действия ЭМ основан на изменении под действием внешнего акусти-

ческого 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  $R_h$  и емкостью  $C_h$ . 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 [4]. 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 – наиболее интенсивно развивающегося сегодня направления микроэлектроники – позволяет ожидать еще

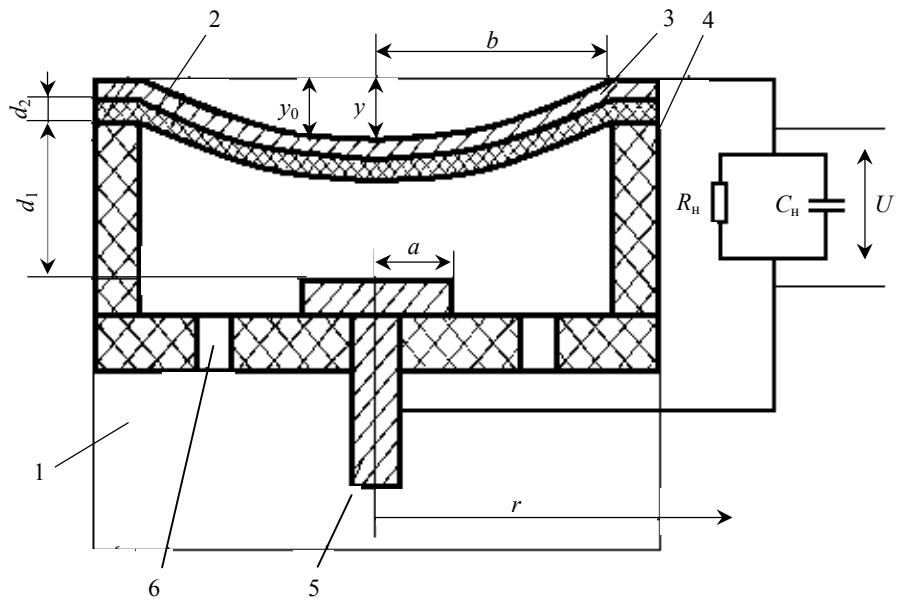


Рис.2. Капсюль электретного микрофона

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

более широкого внедрения КСПО в устройствах современной электроники. Это также обусловлено малостью размеров рабочих зазоров при изготовлении КСПО в микроэлектронном варианте и возможностью использования небольших управляющих электрических напряжений для получения относительно больших электростатических полей и сил. Электрическое поле электрета может дополнительно увеличивать эти силы.

Расчет чувствительности КСПО был выполнен в ряде работ [2, 4, 6-8]. Однако для использования полученных в этих работах зависимостей необходимо знание важнейших параметров капсюля конденсаторного преобразователя: толщины электрета  $d_2$ , величины зазора  $d_1$ , прогиба мембранны  $y$ , электретного поверхностного потенциала  $U_s$ , и натяжения мембранны  $\tau$ . При этом желательно производить измерения параметров мембранны непосредственно в капсюле КСПО (в полусборке). Предлагаемая ниже методика позволяет это сделать. Суть метода заключается в следующем: под действием внешнего электрического поля, созда-

ваемого электретом и электрическим напряжением  $U$ , которое может быть приложено к преобразователю, его мембранны прогибается (из-за наличия электростатических сил), так что ее прогиб в центре составляет некоторую величину  $y_0$ , которая, очевидно, зависит от величины и полярности напряжения  $U$  и указанных выше параметров. Следовательно, электрические емкости  $C$  преобразователя при различных  $U$  будут тоже различны. Таким образом, зная аналитическое выражение для  $C$  в зависимости от  $\tau$ ,  $U_s$ ,  $U$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  и измеряя  $C(U)$ , можно, решая соответствующую систему уравнений, определить искомые параметры. Практическое использование этого подхода, показало, однако, что надежность получаемых таким образом результатов невысока, а при решении соответствующей системы нелинейных уравнений возникают значительные вычислительные трудности. Поэтому ниже будет рассмотрена упрощенная модификация методики, удобная для практического использования.

Будем считать, что под действием электроадгезионных сил мембранны приобретает

куполообразную форму, описываемую выражением

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

Электрическую емкость  $C$  показанной на рис.2 КСПО можно представить как последовательно соединенные емкости воздушного зазора и электрета. В частности, вместо электрета может использоваться и незаряженная мембрана. Учитывая, что величина воздушного зазора в соответствии с (1) различна в различных точках мембраны, емкость воздушного зазора

$$C_1 = \int_0^a \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 2\pi r dr}{d_1 - y_0 \left(1 - \frac{r^2}{b^2}\right)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \pi b^2}{y_0} \ln \left[ 1 + \frac{a^2 y_0}{b^2 (d_1 - y_0)} \right],$$

где  $\epsilon_1$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха,  $\epsilon_1 = 1$ ;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Емкость мембраны можно рассчитать по формуле плоского конденсатора

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 \pi a^2}{d_2}$$

(здесь  $\epsilon_2$  – относительная диэлектрическая проницаемость мембраны) и, так как емкости воздушного зазора и мембраны соединены последовательно (и поэтому  $C^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1}$ ), получим для емкости капсюля КСПО формулу

$$C = \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 \pi a^2}{y_0 d_2} \ln \left[ 1 + \frac{a^2 y_0}{b^2 (d_1 - y_0)} \right]}{\frac{\epsilon_1}{y_0} \ln \left[ 1 + \frac{a^2 y_0}{b^2 (d_1 - y_0)} \right] + \frac{a^2 \epsilon_2}{b^2 d_2}}. \quad (2)$$

Найдем теперь связь между прогибом  $y_0$  мембраны в ее центре и параметрами капсюля КСПО. Учтем, что напряженность электрического поля в зазоре КСПО различна на различных расстояниях от центра мембраны [6]:

$$E_1 = \frac{\epsilon_2 (U + U_{\dot{y}})}{A - \epsilon_2 y(r)}, \quad (3)$$

где  $A = \epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1$ .

Пондеромоторное давление электроадгезионной силы, действующей на мембрану и вызывающей ее прогиб

$$p_1 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_1 E_1^2. \quad (4)$$

На основе (3)-(4) получим, что волновое уравнение в стационарном случае для показанной на рис.2 конструкции примет вид

$$\tau \left( \frac{d^2 y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} \right) = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 (U_{\dot{y}} + U)^2}{2} \frac{1}{(A - \epsilon_2 y)^2}. \quad (5)$$

Подставив в (5) выражение (1) и проинтегрировав полученное уравнение (левую часть – от 0 до  $b$ , так как по физическому смыслу это сила упругости мембраны; правую – от 0 до  $a$ , так как это электростатическая сила), найдем, что статический прогиб  $y_0$  мембраны КСПО в ее центре связан с его параметрами и приложенным электрическим напряжением  $U$  зависимостью

$$4\epsilon_2^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) y_0^3 - 4\epsilon_2 A \left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right) y_0^2 + 4A^2 y_0 - \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 (U_{\dot{y}} + U)^2 a^2}{2\tau} = 0. \quad (6)$$

При  $a = b$  уравнение (6) переходит в квадратное, из которого следует, что статический прогиб мембраны в центре под действием электростатических сил [6]

$$y_0 = \frac{A^2 \pm \sqrt{A^4 - \epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2^3 (U_{\dot{y}} + U)^2 \frac{A a^2}{2\tau}}}{2\epsilon_2 A}.$$

Здесь меньшее значение  $y_0$  соответствует устойчивому равновесию мембраны, которое и реализуется в реальных КСПО.

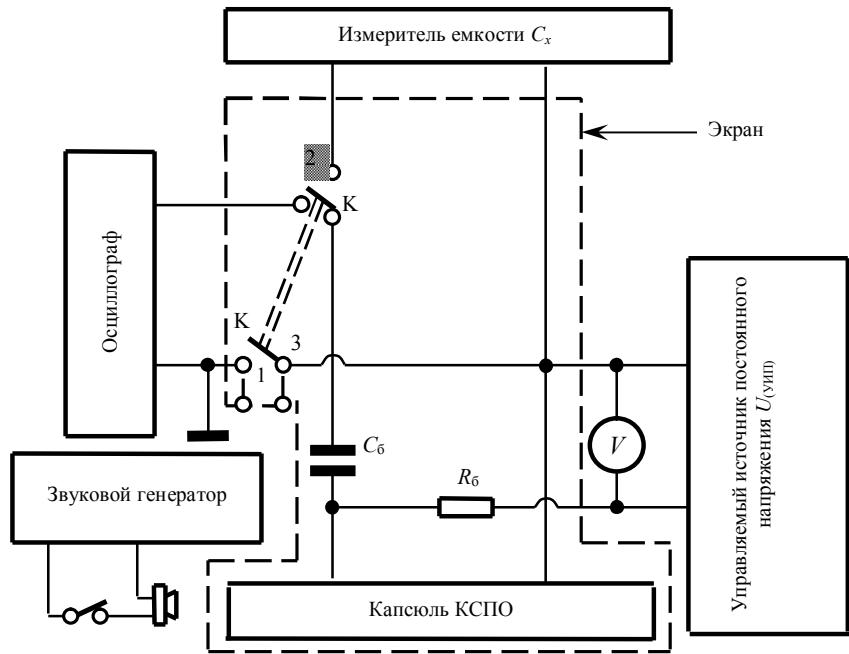


Рис.3. Принципиальная электрическая схема для определения параметров капсюля электретного преобразователя. Экран может быть подсоединен к точке 1 или 3

При  $b \neq a$  ( $b > a$ ) уравнение (5) имеет три корня. Анализ показывает, что один из корней  $y_0$  соответствует положению устойчивого равновесия, второй – неустойчивого, а третий физического смысла не имеет.

Процедура измерений заключается в снятии вольт-фарадной характеристики капсюля КСПО, т.е. в измерении емкости капсюля в зависимости от подаваемого на него внешнего напряжения  $U$ . Как видно из (3), при  $U = -U_0$  напряженность электрического поля в рабочем зазоре равна нулю, мембрана не прогибается (сила тяжести, действующая на нее обычно пре-небрежимо мала) и емкость структуры минимальна:  $C = C_0$ . Поэтому в данном случае КСПО представляет собой плоский двухслойный конденсатор. Следовательно, толщину рабочего зазора  $d_1$  можно найти из формулы для плоского двухслойного конденсатора:

$$\tilde{N}_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 \pi \dot{a}^2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}.$$

Как уже отмечалось, при  $U = -U_0$  из-за отсутствия прогиба мембранны емкость

КСПО минимальна. Найдя экспериментально это значение емкости, можно определить величину и знак поверхностного потенциала электрета: по модулю искомая величина  $U_0$  будет равна приложеному напряжению, а по знаку – противоположна.

Для нахождения натяжения мембранны  $\tau$  необходимо по измеренным значениям емкости КСПО при различных приложенных к ней напряжениях определить соответствующие значения прогиба  $y_0$  на основе формулы (2) с использованием численных методов. Затем полученное значение  $y_0$  надо подставить в (6) и из него найти натяжение мембранны  $\tau$ .

Для реализации разработанной методики используется схема (рис.3), в которой емкость  $C_0$  предназначена для того, чтобы постоянный ток от управляемого источника постоянного напряжения (УИПа) не проходил в измеритель емкости и осциллограф. Величина  $C_0$  должна быть такой, чтобы измеряемая емкость  $C$  не сильно отличалась от емкости преобразователя, для чего реактивное сопротивление блокировочной емкости должно быть мно-

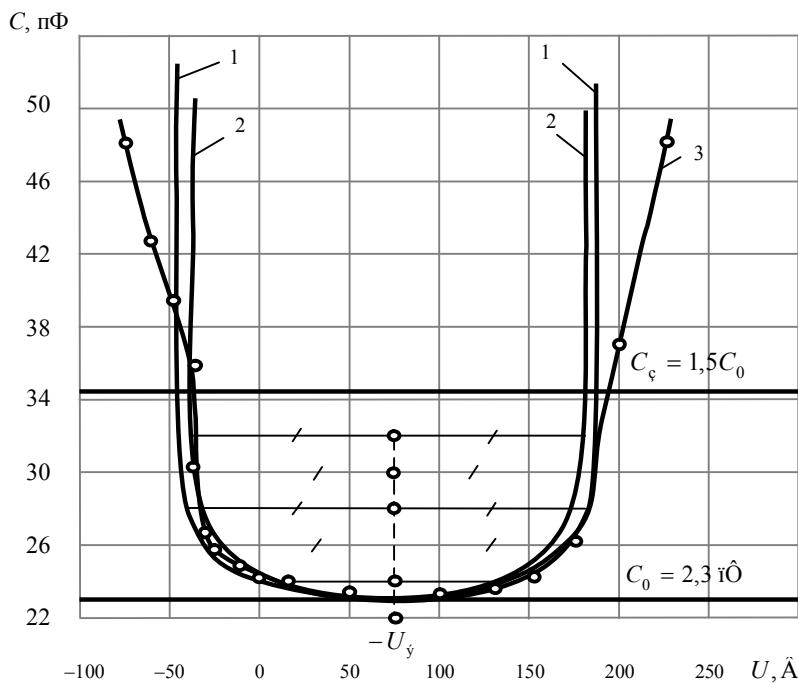


Рис.4. Экспериментальные и расчетные зависимости  $C(U)$  для капсюля микрофона МКЭ-100  
(экран подсоединен к точке 1 – см. рис.3)

1 и 2 – расчетные кривые (результаты расчетов немного различаются из-за использования различных численных методов);  
3 – экспериментальные результаты;  $C_0$  – емкость, соответствующая залипанию мембранны

го меньше реактивного сопротивления измеряемой емкости, т.е. должно выполняться условие

$$\frac{1}{\omega C_a} \ll \frac{1}{\omega C},$$

где  $\omega = 2\pi\psi$ ;  $\psi$  – частота сигнала с измерителя емкости.

Сопротивление  $R_b$  предназначено для того, чтобы сигнал с измерителя емкости не проходил в УИП, и должно быть по возможности большим, чтобы параллельно подсоединеный через  $R_b$  к электретному преобразователю УИП существенно не влиял на показания измерителя емкости, т.е.  $R_a \gg (\omega C)^{-1}$ .

Ограничением, однако, является то, что при  $R_b \rightarrow \infty$  и  $C_b \rightarrow \infty$  постоянная времени переходного процесса  $R_b C_b \rightarrow \infty$  и поэтому реакция схемы на изменение  $U$  будет неоправданно долгой. Для реальных преобразователей оптимальны значения  $C_b$  порядка тысяч пикофарад, а  $R_b$  – порядка сотен мегаом.

Необходимо отметить, что измерения  $C$  с помощью измерителя емкости наиболее удобны практически. Для этой цели подходят приборы типа Е8-4, Е7-8, Р589 или другие мосты переменного тока. В тоже время, измерять  $C(U)$  можно и любым другим пригодным в данном случае способом.

Работа со схемой осуществляется следующим образом. В положении 1 ключа К капсюль КСПО подключается к осциллографу. Если на преобразователь от звукового генератора (ЗГ) с помощью излучателя звука подать акустический сигнал, то на экране осциллографа можно наблюдать вырабатываемый преобразователем электрический сигнал, т.е. можно получить примерный вид амплитудно-частотной характеристики преобразователя в режиме микрофона. Если используется двухлучевой осциллограф, то на него можно подать также сигнал со ЗГ и сравнить возбуждающий и генерируемый сигналы. Иными словами, возможно наблюдение фазочастотных искажений. При оценке чувстви-

тельности капсюля следует иметь в виду, что он работает на  $RC$ -нагрузку (здесь  $R$  – сопротивление входа осциллографа;  $C \approx 100$  пФ – емкость соединительного кабеля и входа осциллографа). Это, однако, не влияет на результат измерения  $U_3$ . Для более точных измерений  $U_3$  рекомендуется производить их на резонансной частоте колебаний мембранны преобразователя, когда сигнал максимален.

В процессе измерения, подавая с УИПа электрическое напряжение, наблюдают изменение величины сигнала преобразователя, так как напряженность электрического поля в зазоре при этом изменяется. При  $U = -U_3$  сигнал будет отсутствовать. Таким образом, возможно измерение  $U_3$  электрета, находящегося непосредственно в капсюле еще одним способом.

В положении 2 ключа К измеряется  $C = C(U)$ . По полученной зависимости может быть определено  $U_3$  и рассчитаны  $d_1$  и  $\tau$  на основе выведенных выше соотношений. За счет наличия паразитных емкостей измеряемая емкость  $C_x$  отлична от истинного ее значения  $C$ . Однако, указанные паразитные емкости могут быть легко измерены, а в ряде случаев даже рассчитаны, т.е. их можно считать известными и учесть в расчетах.

В качестве примера использования методики приведены результаты тестирования капсюля электретного микрофона МКЭ-100 (рис.4). Определенные рассматриваемым способом значения  $U_3 = -75$  В и натяжения мембранны  $\tau = 23$  Н/м соответствуют реальным значениям.

Рассмотренная здесь процедура является неразрушающим методом контроля параметров капсюля КСПО и позволяет по одной операции снятия вольт-фарадной характеристики определять целый комплекс его важнейших параметров. Это является важным преимуществом предлагаемой методики и делает ее незаменимой при разработке и экспериментальных исследованиях КСПО. На данную методику получены авторское свидетельство и патент [4], она может быть внедрена в учебный процесс [1-2] и имеет перспективу промышленного использования [4, 7-9].

## 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. Ганенков Н.А. 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.
3. Климова Н.В. Модификация термостойких фотолаков для новых областей применения / Н.В.Климова, Г.К.Лебедева, Л.В.Рудая, Т.А.Юрре, И.М.Соколова, Н.С.Пщелко // Петербургский журнал электроники. 2002. № 3. С.33-37.
4. Пат. РФ № 2132116 Н 04 Р 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 // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб, 1997. Вып.504. С.87-92.
7. Kozodaev D.A. Analysis of Electret Sub-Miniature Microphones / D.A.Kozodaev, N.S.Pshchelko, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE-10. Athens, 1999. P.973-978.
8. 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.
9. Pshchelko N.S. C-V – Testing of Electret Transducers / N.S.Pshchelko, I.M.Sokolova, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE-8. Paris, 1994. P.1028-1033.

## REFERENCES

1. Ganenkov N.A. Electret Electromechanical Transducers / N.A.Ganenkov, N.S.Pshchelko / /Radio electronics in Saint Petersburg Electrotechnical Institute «LETI». Saint Petersburg, 1996. Issue 2. P.121-126.
2. Ganenkov N.A. Theory and Calculation of Electromechanical Transducers on Active Dielectrics: The manual / N.A.Ganenkov, V.I.Zakrzhevsky, O.I.Koldunov, N.S.Pshchelko / Electrotechnical Institute «LETI». Saint Petersburg, 1994. 43 p.
3. Klimova N.V. Modification of Heat-resistant Photovarnishes for New Applications / N.V.Klimova, G.K.Lebedeva, L.I.Rudaja, T.A.Jurre, I.M.Sokolova, N.S.Pshchelko // The Petersburg magazine of electronics. Saint Petersburg, 2002. № 3. P.33-37.
4. The patent of the Russian Federation № 2132116 Н 04 Р 29/00. Method of determining the quality of electret and electroacoustic converters and devices for its reducing to practice / F.I.Batalov, N.S.Pshchelko, A.S.Yastrebov. Publ. 27.05.99. Bulletin No 17. Part 2.
5. Pshchelko N.S. Procedure For the Calculation of Electret Receiving Electroacoustic Transducers/ N.S.Pshchelko, V.N.Tairov // Sov. Phys. Acoust. 1988. Vol.34. № 4. P.706-710.

6. *Pshchelko N.S.* Optimisation of Elctret Microphones Parametres / N.S.Pshchelko, D.A.Kozodaev / /News of Electrotechnical Institute «LETI». St-Petersburg, 1997. Issue 504. P.87-92.
7. *Kozodaev D.A.* Analysis of Electret Sub-Miniature Microphones / D.A.Kozodaev, N.S.Pshchelko, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE-10. Athens, 1999. P.973-978.
8. *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.
9. *Pshchelko N.S.* C-V – Testing of Electret Transducers / N.S.Pshchelko, I.M.Sokolova, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE-8. Paris, 1994. P.1028-1033.