НАНОТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

NANOTECHNOLOGIES AND INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 621.395.61: 621.319.2 (076)

Т.Р.АКЧУРИН, *канд. физ.-мат. наук, доцент, atimur@yandex.ru*
Н.С.ПЩЕЛКО, *канд. техн. наук, доцент, nikolsp@mail.ru*
В.В.БУЕВИЧ, *студент, vlad_imir08@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

T.R.AKCHURIN, *PhD in phys.& math., associate professor, atimur@yandex.ru*
N.S.PSHCHELKO, *PhD in eng. sc., associate professor, nikolsp@mail.ru*
V.V.BUEVICH, *student, vlad_imir08@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрено программное обеспечение для реализации алгоритма определения параметров капсюля конденсаторной структуры с подвижными обкладками на основе использования силового действия электростатического поля. Предлагаемая методика позволяет по одной операции снятия вольт-фарадной характеристики определять целый комплекс важнейших параметров капсюля – величину рабочего воздушного зазора, прогиб мембраны, электретный поверхностный потенциал и натяжение мембраны. Получены выражения, связывающие емкость капсюля с указанными параметрами. Разработано программное обеспечение для использования методики, позволяющее определять искомые параметры капсюля и оценить их погрешность. Рассмотренный в настоящей работе метод контроля является неразрушающим.

***Ключевые слова*:** программное обеспечение, конденсаторная структура, неразрушающий контроль.

THE SOFTWARE FOR THE CONTROL OF CAPACITANCE STRUCTURES PARAMETERS ON THE BASIS OF ELECTROSTATIC FIELD POWER ACTION USE

The software for the procedure of definition of parameters of a cap of condenser structure with mobile facings on the basis of use of power action of an electrostatic field is considered. The offered technique allows on one operation of removal volt – capacitance characteristics to define the whole complex of the major parameters of a cap – size of a working air gap, a membrane deflection, electret surface potential and a membrane tension. The expressions for capacity of a cap as a function of specified parameters are obtained. The software is developed for the technique use, allowing to define required parameters of a cap and to estimate their error. The procedure considered in the present work is a not destroying monitoring.

***Key words*:** the software, the condenser structure, not destroying control.

В настоящее время в различных отраслях техники находят все большее применение технологии и устройства, основанные на использовании электрических полей и электростатических (пондеромоторных) сил, создаваемых электрическими зарядами (ЭЗ), которые могут накапливаться и длительно сохраняться в диэлектрических материалах.

Интерес к технологиям и устройствам на основе ЭЗ обусловлен рядом их преимуществ, а иногда и незаменимостью. В связи с этим необходимо отметить исключительно низкое энергопотребление соответствующих устройств. Так, энергопотребление электростатических реле в десятки тысяч раз меньше лучших (в рассматриваемом смысле) образцов реле неэлектростатического типа. Если в качестве источника электрического поля используется электрет (электризованный диэлектрик, длительно сохраняющий неравновесный ЭЗ), то устройство вообще может не потреблять электрической энергии в процессе работы. Очевидно, указанное преимущество актуально при использовании различных устройств в условиях с ограниченным запасом энергоресурсов. Другим важным положительным

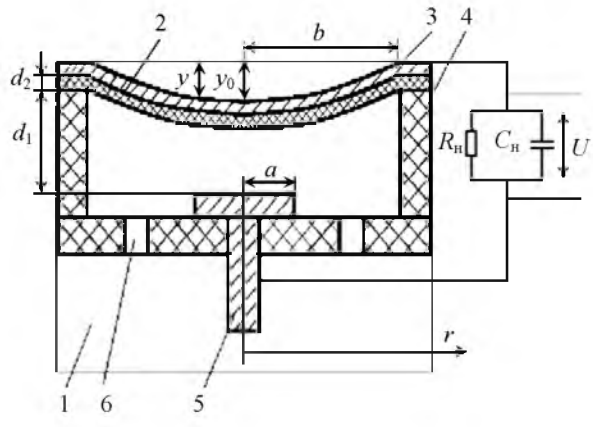


Рис.1. Капсюль электретного микрофона:
a – радиус противоэлектрода; b – радиус мембраны; d_1 – толщина прокладки, обеспечивающей воздушный зазор между мембраной и противоэлектродом; d_2 – толщина мембраны (электрета); y_0 – прогиб мембраны в ее центре; y – прогиб мембраны на расстоянии r от центра мембраны

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

свойством ЭЗ являются конструкции, которые, как правило, выполнены на основе их использования, они отличаются простотой и не требуют громоздкого дорогостоящего оборудования. Это связано с тем, что в основе конструкции используется обычная конденсаторная металлодиэлектрическая структура с подвижными обкладками (КСПО). В настоящее время 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, сочетающейся с их относительно низкой стоимостью. Примером таких устройств – сенсоров являются электретные микрофоны, выпуск которых в мире в настоящее время превышает 90 % от числа всех выпускаемых микрофонов (рис.1).

Расчет чувствительности КСПО был выполнен в ряде работ, однако, для использования полученных в этих работах выражений необходимо знание важнейших параметров капсюля конденсаторного преобразователя. Вместе с тем методы контроля параметров КСПО разработаны недостаточно полно. К числу наиболее важных параметров капсюля КСПО относятся толщина электрета d_2, величина рабочего воздушного зазора d_1, прогиб мембраны y, электретный поверхностный потенциал $U_э$ и натяжение мембраны τ (рис.1). При этом желательно производить измерения параметров мембраны непосредственно в капсюле КСПО (в полусборке). Рассмотренная в [1, 2] методика позволяет это сделать. Суть метода заключается в следующем: под действием внешнего электрического поля, создаваемого электретом и электрическим напряжением U, которое может быть приложено к преобразователю, его мембрана в центре прогибается y_0 (из-за наличия электростатических сил). Очевидно, в зависимости от величины и полярности U, а также в зависимости от значений указанных выше параметров, величины y_0 будут различны. Следовательно, электрические емкости C преобразователя при различных U будут тоже 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.

Капсюли различных КСПО могут быть различны по конструкции, однако основные элементы в них те же, что и у конструкции, показанной на рис.1. Поэтому в качестве примера рассмотрим электретный микрофон.

Будем считать, что под действием электроадгезионных сил, создаваемых полем электрета и внешним приложенным электрическим напряжением, мембрана приобретает куполообразную форму (рис.1), описываемую выражением

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

В [1] было показано, что при этом электрическая емкость КСПО зависит от прогиба мембраны y_0 в ее центре:

$$C = \frac{\dfrac{\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2\pi a^2}{y_0 d_2}\ln\left[1+\dfrac{a^2 y_0}{b^2(d_1-y_0)}\right]}{\dfrac{\varepsilon_1}{y_0}\ln\left[1+\dfrac{a^2 y_0}{b^2(d_1-y_0)}\right]+\dfrac{a^2\varepsilon_2}{b^2 d_2}}, \qquad (2)$$

где ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха, $\varepsilon_1 = 1$; ε_0 – электрическая постоянная; ε_2 – диэлектрическая проницаемость материала электрета. Сам прогиб y_0 зависит от параметров капсюля и приложенного к нему напряжения [1]:

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

$$+ 4A^2 y_0 - \frac{\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2^2(U_э+U)^2 a^2}{2\tau} = 0. \qquad (3)$$

В случае $b \neq a$ ($b > a$) уравнение (3) имеет три корня. Анализ показывает, что меньший положительный из корней y_0 соответствует положению устойчивого равновесия, второй – неустойчивого, а третий (отрицательный) не имеет физического смысла.

При измерении снимают вольт-фарадные характеристики капсюля КСПО, т.е. измеряют емкость капсюля в зависимости от подаваемого на него внешнего напряжения U. Как видно из (3), при $U = -U_э$, мембрана не прогибается (сила тяжести, действующая на нее обычно пренебрежимо 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:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2\pi a^2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}. \qquad (4)$$

Найдя экспериментально значение емкости, можно определить величину и знак поверхностного потенциала электрета: по модулю искомая величина $U_э$ будет равна приложенному напряжению, а по знаку – противоположна.

Для нахождения натяжения мембраны τ 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 (3) и из последнего выражения найти натяжение мембраны τ.

Для снятия вольт-фарадной характеристики используется схема, рассмотренная в [1]. 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. С учетом этих значений величины емкостей $C = C_i$, используемые в расчетах, отличаются от измеренных C_x. На рис.2 показана эквивалентная схема, в которой учитывается наличие паразитных и блокировочной емкостей: $C_{п.м}$ – паразитная емкость монтажа, $C_{п.п}$ – паразитная емкость преобразователя (емкость капсюля при отсутствии мембраны над противоэлектродом), $C_{УИП}$ – паразитная емкость, вносимая при подключении управляемого источника питания и соответствующего монтажа.

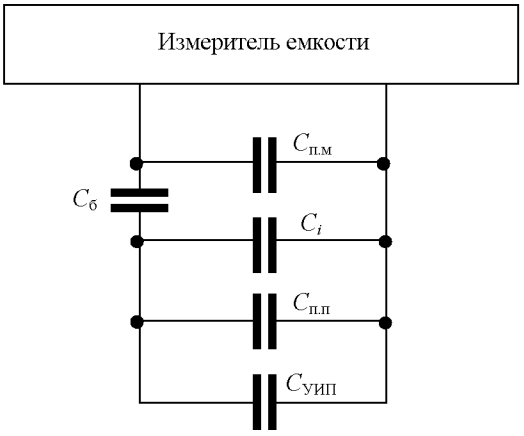


Рис.2. Эквивалентная схема для расчета значений емкости КСПО с учетом паразитной и блокировочной емкостей

С учетом этой схемы получим

$$C_i = \frac{C_{\text{б}}(C_x - C_{\text{п.м}})}{C_{\text{б}} - (C_x - C_{\text{п.м}})} - (C_{\text{п.п}} + C_{\text{УИП}}). \quad (5)$$

Практическое использование разработанной методики предполагает применение численных методов и обработку достаточно большого числа экспериментальных измерений. В связи с этим разработано программное обеспечение, реализующее указанные выше вычисления. Кроме того, дополнительно учтены некоторые особенности, уточняющие выполненные в наших более ранних работах расчеты.

1. Известно, что аппроксимация (1), хотя и достаточно точна, но все же дает несколько завышенное значение электростатических сил. В [3] для учета этого обстоятельства вместо реального значения результирующего потенциала $(U_{\text{э}} + U)$ использовано его так называемое эффективное значение $(U_{\text{э}} + U)^* = 0{,}796(U_{\text{э}} + U)$. Однако рассчитанный поправочный коэффициент имеет значение 0,796 лишь на границе устойчивости мембраны. Такая ситуация возникает, когда силы упругой реакции мембраны уже не могут компенсировать электростатические силы, действующие на нее, и мембрана залипает на противоэлектрод. В этом случае корни уравнения (3), соответствующие устойчивому и неустойчивому равновесию мембраны, совпадают. Если же электростатические силы на мембрану не действуют ($U_{\text{э}} = -U$), то мембрана параллельна противоэлектроду и расчет электростатических сил в такой структуре производится на основе обычной формулы для двухслойного плоского конденсатора. При этом поправочный коэффициент вводить не нужно или его следует считать равным единице. Поэтому в разработанной программе в режиме «параметры известны» при расчете методом Зейделя статического прогиба y_0, соответствующего устойчивому равновесию мембраны, в (3), вместо $(U_{\text{э}} + U)$, подставлялось значение

$$(U_{\text{э}} + U)^* = k_1(U_{\text{э}} + U), \quad (6)$$

где k_1 – линейная функция, сконструированная так, чтобы она равнялась единице, при $U_{\text{э}} = -U$, и 0,796 на границе устойчивости мембраны, когда результирующее напряжение залипания $(U_{\text{э}} + U)_{\text{з}}$ на капсюле электретного преобразователя соответствует началу залипания мембраны:

$$k_1 = 1 - 0{,}204\frac{(U_{\text{э}} + U)^2}{(U_{\text{э}} + U)_{\text{з}}^2}, \quad (7)$$

где [3]

$$(U_{\text{э}} + U)_{\text{з}} = \pm\frac{10}{a}\sqrt{\frac{\tau b^3(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)^3}{27(2b-a)(2b^2-a^2)\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2^3}}. \quad (8)$$

2. При изменении емкости капсюля под действием приложенного к нему напряжения величина емкости изменяется от значения C_0 при $U_{\text{э}} = -U$ до $1{,}5C_0$ при $(U_{\text{э}} + U) = (U_{\text{э}} + U)_{\text{з}}$ [3]. Поэтому в режиме «параметры неизвестны» после расчета методом Ньютона – Раффсона значения прогиба y_0 (2) при дальнейших вычислениях натяжения мембраны (3) вместо ($U_{\text{э}} = +U$) подставлялось значение

$$(U_{\text{э}} + U)^* = k_2(U_{\text{э}} + U), \quad (9)$$

где

$$k_2 = 1{,}408 - 0{,}408\frac{C_i}{C_0}. \quad (10)$$

Функция k_2 сконструирована так, чтобы она равнялась единице при $C_i = C_0$ (мембрана параллельна противоэлектроду, так как при этом $U_э = -U$) и принимала значение 0,796 при $(U_э + U) = (U_э + U)_з$, т.е. на границе устойчивости мембраны.

Отметим, что введение функций k_1 и k_2 лишь уточняет использование и так достаточно хорошей аппроксимации (1), поэтому их можно принять линейными.

3. Программа реализует расчет погрешности косвенных измерений параметров капсюля КСПО. При этом учтена приборная погрешность косвенных измерений и случайная составляющая погрешности, связанная с разбросом определяемых величин. Случайная составляющая погрешности учитывалась только при расчете погрешностей электретного поверхностного потенциала $U_э$ и натяжения мембраны τ, так как эти параметры вычислялись как средние значения, полученные по большому числу точек вольт-фарадной характеристики КСПО, аппроксимированной полиномом по методу наименьших квадратов.

Общая формула для расчета погрешности Δy искомого параметра y (под y подразумевается один из следующих параметров: электретный поверхностный потенциал $U_э$, толщина рабочего зазора d_1, натяжение мембраны τ и ее статический прогиб y_0 под действием только поля электрета, т.е при $U = 0$) имеет вид

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\partial y}{\partial x_j}\right)^2 \Delta x_j^2 + \frac{\sum_{k=1}^{n}\left(\bar{y} - y_k\right)^2}{n(n-1)}}, \quad (11)$$

где x_j – известные параметры капсюля (например, a – диаметр противоэлектрода, ε_2 – диэлектрическая проницаемость материала электрета и др.); Δx_j – погрешности прямых измерений этих величин; N – число известных параметров x_j, от которых зависит определяемый параметр y; среднее арифметическое значение $\bar{y}$ вычисляется по формуле

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^{n} y_k}{n}$$

по результатам использования n точек вольт-фарадной характеристики КСПО, которая аппроксимируется полиномом.

Интерфейс программы реализует задание порядка полинома и его можно подобрать так, чтобы после построения вольт-фарадной характеристики (кнопка «построить ВФХ») кривая наилучшим образом проходила между экспериментальными точками.

Первое слагаемое в (11) представляет собой приборную погрешность косвенного измерения определяемого параметра, а второе – дает его погрешность, обусловленную случайным разбросом.

4. Анализ погрешностей определяемых параметров показал, что они будут наибольшими при $U = U_э$. Поэтому расчет параметров КСПО производится для точек вольт-фарадной характеристики в диапазоне $C_i = 1{,}2C_0 \text{-} 1{,}5C_0$, в котором значения U существенно отличаются от $-U_э$.

Программа имеет два основных режима работы.

В режиме «Параметры неизвестны» искомые параметры капсюля КСПО (величина рабочего воздушного зазора d_1, прогиб мембраны $y_{ост}$ в ее центре под действием поля электрета, электретный поверхностный потенциал $U_э$ и натяжение мембраны τ) определяются по результатам экспериментально снятой вольт-фарадной характеристики капсюля. При этом значения напряжения и соответствующего ему значения емкости могут быть введены в окна U_i, C_{xi} (в порядке возрастания значений U_i) и сохранены с помощью кнопки «Новая», либо загружены с помощью кнопки «Загрузить» из отдельного, заранее составленного файла. При вводе указанных значений на экране отображаются экспериментальные точки, пересчитанные из значений C_{xi} в C_i в соответствии с (5). Максимальное значение C_i не должно превышать его минимального зна-

чения более чем в 1,5 раза. Для выполнения расчетов в окна «Входные данные» и «Погрешность» надо ввести соответственно значения других, известных значений параметров капсюля и их погрешностей. Кнопкой «Порядок аппроксимации» выбирается порядок полинома, аппроксимирующего по экспериментальным точкам вольт-фарадную характеристику в виде кривой. Кривая должна иметь один минимум приблизительно при $U = -U_э$ (это следует из физических соображений). Построение аппроксимирующей кривой – полинома осуществляется при нажатии кнопки «Построить ВФХ». Кнопка «Старт» запускает программу, в результате чего в окнах «Результаты» появляются рассчитанные значения искомых параметров (левая колонка чисел) и их погрешности (правая колонка) в соответствии с (11), а также рассчитанная при значениях этих параметров в исследованном диапазоне напряжений вольт-фарадная характеристика капсюля КСПО.

В режиме «Параметры известны» вместо надписи «Результаты» появляется «Введите параметры». После ввода параметров в соответствующие окна и запуска программы кнопкой «Старт» появляется расчетная вольт-фарадная характеристика данного капсюля в диапазоне напряжений, не приводящем к ее залипанию на противоэлектрод под действием электростатических сил. Данный режим используется для проверки



Рис.3. Значения известных параметров капсюля микрофона МКЭ-100 и их погрешности

выполненных расчетов: если оставить в окнах значения параметров, рассчитанных в режиме «Параметры неизвестны», и перейти в режим «Параметры известны», то в результате расчета вольт-фарадной характеристики должна получиться кривая, близкая к экспериментально полученной вольт-фарадной характеристике капсюля КСПО.

Разработанное программное обеспечение использовалось для неразрушающего контроля параметров капсюлей некоторых КСПО – электретных микрофонов, датчика перепада давлений, электропневматического преобразователя и др. [2]. Рассмотрим пример такого использования для исследования капсюля микрофона МКЭ-100:

На рис.3 показаны значения известных параметров капсюля и их погрешности. Приведем экспериментально полученные значения зависимости емкости капсюля этого микрофона от напряжения на нем:

U, В	C_x, пФ
–40	79,80
–30	71,38
–20	69,72
10	68,32
0	66,75
25	65,56
50	64,98
75	64,82
110	65,12
125	65,95
150	67,58
175	71,10

Сравнение результатов, а также их сопоставление с экспериментально полученными (с учетом формулы (5)) и паспортными данными микрофона свидетельствуют о том, что разработанная методика и соответствующее программное обеспечение позволяют в целом правильно определять значения искомых параметров.

Разработанное программное обеспечение может быть эффективно использовано при конструировании, экспериментальном исследовании и неразрушающем контроле КСПО различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пщелко Н.С.* Методика определения параметров капсюлей конденсаторных структур с подвижными обкладками // Записки Горного института. 2010. Т.187. С.117-124.

2. *Пщелко Н.С.* Использование электрического поля для получения и неразрушающего контроля емкостных сенсоров и активаторов / Н.С.Пщелко, В.В.Буевич // Записки Горного института. 2010. Т.186. С.253-256.

3. *Пщелко Н.С.* Разработка моделей и методик расчета электроадгезии в системах металл (полупроводник) – диэлектрик: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Л., 1988. 22 с.

REFERENCES

1. *Pshchelko N.S.* Procedure for determination of parameters of a condensing structures with a movable capacitor plates // The Proceedings of the Mining Institute. 2010. Vol.187. P.117-124.

2. *Pshchelko N.S., Buevich V.V.* Electrostatic field use for manufacturing and nondestructive testing of a condenser sensors and actuators // The Proceedings of the Mining Institute. 2010. Vol.186. P.253-256.

3. *Pshchelko N.S.* Working of models and design of procedures for calculation of electric adhesion in metal (semiconductor) – dielectric systems: Phd thesis. Leningrad, 1988. 22 p.