

ВЛИЯНИЕ ПОДЛОЖКИ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА

Джежора А. А., Рубаник В. В.

УО «Витебский государственный технологический университет»,
ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь
vstu@vitebsk.by, ita@vitebsk.by

При эксплуатации электроемкостные датчики работают в различных дестабилизирующих условиях, вызванных внешними электромагнитными воздействиями. Они подвержены кумулятивному эффекту со стороны ближайших предметов, электрически связанных с землей. Это, в конечном счете, приводит к неоднозначности результатов измерений. Для устранения этого недостатка используют конструкцию датчика с заземленным экраном над контролируемым материалом [1]. Основу датчика составляют ленточные электроды, расположенные на экранированной подложке (рис.1.) В основании подложки находится плоский заземленный электрод охраны 3. Дополнительный плоский заземленный экран размещен поверх контролируемого диэлектрического слоя 4. Он является подвижным. В экспериментальной установке его положение фиксируется с помощью микрометрического винта. Электрическое поле, создаваемое высокопотенциальными электродами 1, проникая через материал, замыкается на низкопотенциальных электродах 2. Оно ограничено в пространстве плоскими электродами 3 и 4. Низкопотенциальные электроды 2 имеют потенциал земли V_2 . В отсутствие дополнительного экрана 4, глубина зоны контроля определяется геометрическими размерами секции датчика и не превосходит половины ее ширины, т.е. r . Введение в конструкцию дополнительного заземленного экрана над контролируемым материалом изменяет глубину проникновения поля, характер поля, как в области контроля, так и в подложке.

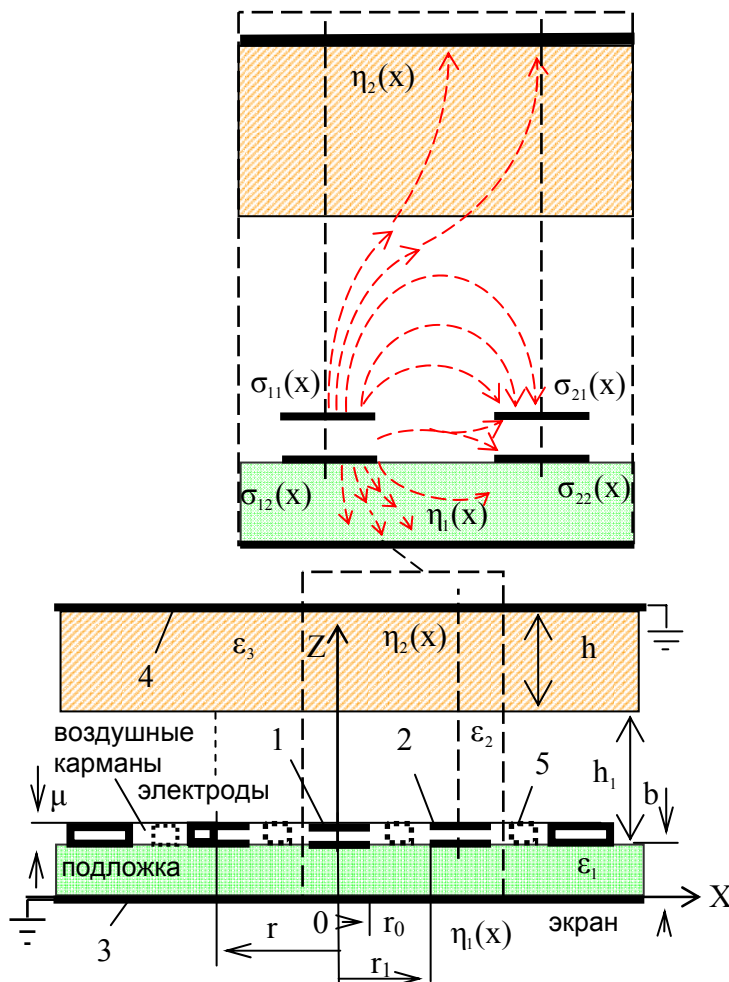


Рис.1. Вид датчика МЭНИК сбоку

В существующей полукваналитической модели [2] не учитывается конечная толщина электродов для повышения точности расчета параметров многосекционного экранированного накладного измерительного конденсатора (МЭНИК), оптимизации его конструкции.

Были решены следующие задачи:

– с учетом реальной толщины электродов, что крайне важно при проектировании датчиков на тонких подложках построена математическая модель МЭНИК. Каждый из электродов рассматривался в виде двух зеркально-симметричных бесконечно тонких электродов, разнесенных в пространстве на расстояние равное толщине реальных электродов μ . При создании модели МЭНИК использовали системы интегральных уравнений Фредгольма первого рода и метод зеркальных отображений;

– на основе системы компьютерной математики MAPLE X созданы программы для проведения численных расчетов электрических полей МЭНИК, приведено компьютерное моделирование и анализ электрических полей датчика.

Проверку адекватности модели (рис.1) реальным конструкциям проводили на датчиках с металлизацией 0,60 (отношение площади электродов к полной площади датчика). Электроды вытравливали на двустороннем фольгированном стеклотекстолите марки СТФ толщиной 1мм. Толщина медного покрытия составляла 20 $\mu\text{м}$. Ширина потенциальных электродов $2r_0 = r - r_0 = 6$ мм и число секций $n = 7$. К датчику прижимался односторонний фольгированный стеклотекстолит СТФ толщиной $h = 1,58$ мм. Толщина воздушного зазора составила $h_1 \approx 0,02 \mu\text{м}$. Измеренная емкость - 0,599 пФ, расчетная - 0,591 пФ. Погрешность расчета $\delta C = 1,5\%$.

В работе [2] рассмотрен диапазон толщин, где обнаружен двойной результат в определении диэлектрической проницаемости контролируемого материала. Отсутствие у модели [2] реальной толщины электродов, не позволило проследить картину трансформации поля. Рассмотрим датчик, выполненный на подложке из тефлона ($\epsilon_1 = 2,1$) с металлизацией поверхности 0,5. Толщина подложки $b = 508$ мкм, размер секции $r = 1$ мм, Ширина электродов $2r_0 = r - r_1 = 0,5$ мм, толщина электродов $\mu = 7$ мкм. В качестве объекта контроля возьмем диэлектрик с $\epsilon_3 = 5,7$. Толщину диэлектрического слоя h будем изменять в пределах 0–700 мкм. Так как поверхность диэлектрика не идеальна, то толщину воздушного зазора h_1 будем дискретно варьировать в пределах от 0 до 40 мкм. Из семейства расчетных кривых (рис.2.) видно, что воздушный зазор играет важную роль в образовании аномальных областей, где с ростом диэлектрической проницаемости межэлектродная емкость уменьшается. В этой области, где находится контролируемый диэлектрик, плоский экран 4, «оттягивает» потоки электрического поля и межэлектродная емкость мала. Об этом говорит знак алгебраической суммы зарядов ΔN , на стороне высокопотенциального электрода 1, обращенного к контролируемому материалу, и зарядов, расположенных на экране 4.

Если знак суммы $\Delta N < 0$, то поток электрического поля, исходящий со стороны высокопотенциального электрода 1, обращенного к контролируемой среде, искривляясь, полностью замыкается на заземленный экран. Для кривой 2 (рис.2) $\Delta N < 0$ при всех $(h + h_1)/(r_1 - r_0) < 0,8$. В этом случае межэлектродная емкость C_{12} , создается потоком электрического поля, исходящим из высокопотенциального электрода 1 со стороны, обращенной к подложке и замыкающимся частично на электрод 2. Так как этот поток замыкается в основном в воздушных карманах, то значение C_{12} мало. Она меньше емкости, создаваемой в воздухе, при поднесении к датчику плоского заземленного экрана – (кривая 4 на рис.2). Когда знак алгебраической суммы зарядов ΔN , изменяется на противоположный, то происходит трансформация поля. Часть потока электрического поля, исходящая из высокопотенциального электрода 1 со стороны, обращенной к экрану, замыкается на низкопотенциальный электрод 2 и создает составляющую рабочей емкости, отличную от нуля. Начинается рост межэлектродной емкости C_{12} с ростом диэлектрической проницаемости контролируемого диэлектрика. Диапазон аномальной области зависит от воздушного зазора h_1 . С ростом зазора верхняя граница аномаль-

ной область смещается вправо рис.2, в область более высоких значений диэлектрической проницаемости. Верхняя граница аномальной области размыта и представляет собой очень узкий диапазон критических толщин диэлектрического слоя. Для кривой 2 диапазон критических толщин расположен вблизи критической толщины $h = 320$ мкм, для кривой 3 вблизи толщины $h = 440$ мкм.

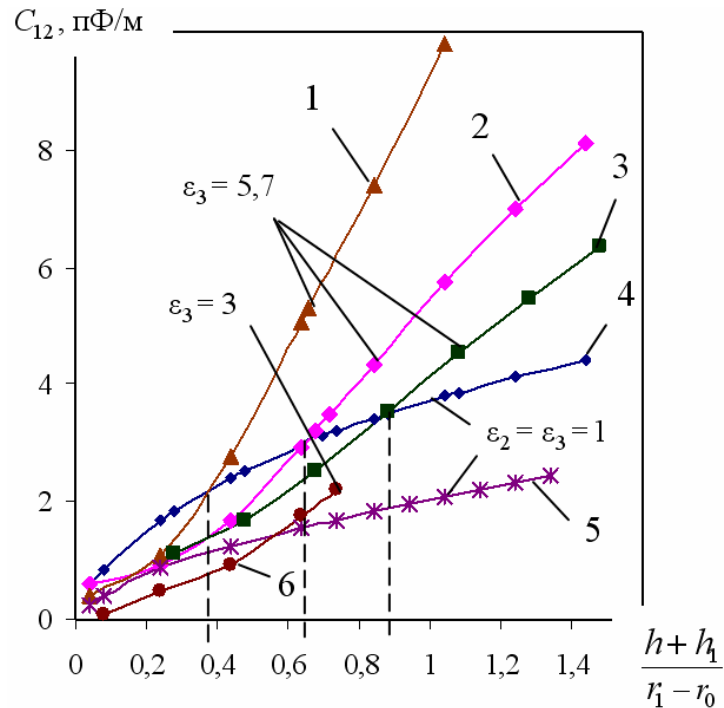


Рис. 2. Зависимость межэлектродной емкости C_{12} на единицу длины от относительного расстояния между заземленным экраном и электродами. Кривая 1 соответствует $h_1 = 0$; 2 и 6 – $h_1 = 20$ мкм; 3 – $h_1 = 40$ мкм

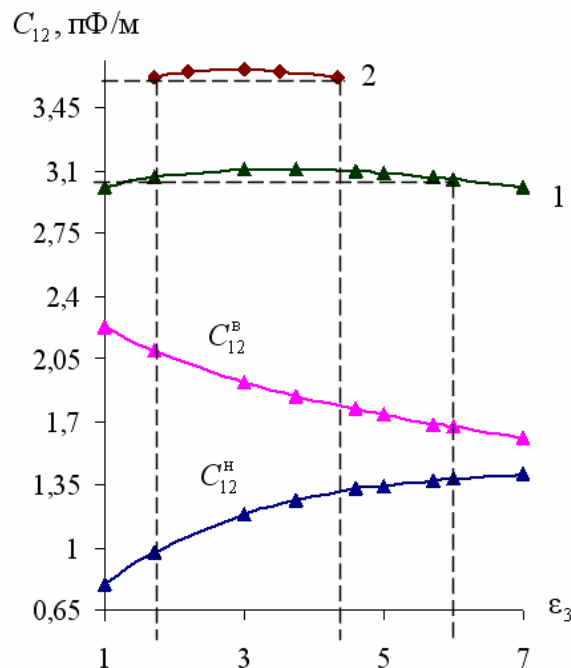


Рис.3. Межэлектродная емкость C_{12} как функция ϵ_3 . Кривая 1 соответствует $h_1 = 20$ мкм; 2 – $h_1 = 40$ мкм.

В случае, когда толщина воздушного зазора h_1 составляет 20 мкм, для диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью ϵ_3 , наблюдается эффект двойственного результата в критическом диапазоне. Он заключается в том, что диэлектрикам с различной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_3=1,7$ и $\epsilon_3=5,7$, но одинаковой толщиной диэлектрического слоя, например $h = 310$ мкм, соответствует одно значение емкости $C_{12} = 3,065$ пФ/м (рис.3). Для воздушного зазора $h_1 = 40$ мкм (кривая 3), критическая толщина составляет $h = 440$ мкм и диэлектрикам с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_3=1,7$ и $\epsilon_3= 4,35$, имеющим толщину $h = 440$ мкм соответствует значение емкости $C_{12} = 3,62$ пФ/м. Двойственность результата обусловлена различной скоростью изменения составляющих межэлектродной емкости C_{12} на различных сторонах электродов. Из кривых на рис.3 видно, что при $\epsilon_3 < 3,5$ на верхней стороне электродов, обращенной к контролируемому диэлектрику, скорость падения емкости C_{12}^B меньше скорости роста емкости C_{12}^H на нижней стороне электродов, обращенных к подложке. При $\epsilon_3 > 3,5$ скорость роста C_{12}^B уменьшается и становится меньше скорости падения C_{12}^B . Отличия скоростей роста и падения составляющих емкостей связано с различным распределением зарядов на различных сторонах электрода 2. Наличие аномальной области присуще и датчику с диэлектрической проницаемостью подложки $\epsilon_1=4,2$, когда толщина подложки уменьшается в два раза (кривые 5 и 6 на рис.2).

Выводы

Присутствие экрана над контролируемым объектом, в области критической толщины, контролируемого материала может привести к потере чувствительности датчика к диэлектрической постоянной или неоднозначности результата измерения. Для устранения эффекта двойственности, измерения необходимо проводить за пределами аномальной области. Верхняя граница аномальной области определяется сменой знака алгебраической суммы зарядов, расположенных на стороне высокопотенциального электрода 2, обращенной к подложке и зарядов расположенных на заземленном экране 4 ΔN . При контроле анизотропии структуры ортотропных материалов необходимо использовать датчики на тонкой подложке, толщина которой значительно меньше межэлектродного зазора $b \ll r_1 - r_0$, при этом толщина контролируемого материала h должна быть сравнима с межэлектродным зазором $h \approx r_1 - r_0$. Справедливость модели подтверждена экспериментальными измерениями емкости C_{12} как в присутствии заземленного экрана 4 так и без него.

Список литературы

1. А. С. 667914 СССР, МКИ G 01 R 27/26. Измерительный конденсатор / В.Д. Целищев, А.Д. Букарев. – № 2380388/18 – 21; заявл. 01.07.76; опубл. 30.05.79, Бюллетень № 22.
2. A.V. Mamishev, B.C. Lesieutre, M. Zahn «Optimization of Multi-Wavelength Interdigital Dielectrometry Instrumentation and Algorithms», IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.- 1998. Vol. 5, № 3.- P. 408–420
3. Y. Sheiretov and M. Zahn, «Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric», IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 2005.- Vol. 12, № 5.- P. 993–1004.