

Использование лабораторной испытательной машины со встроенным профилометром IMAL IBX600 при ежесменном контроле позволяет существенно снизить время проведения испытаний, что позволяет оперативнее замечать несоответствие продукции установленным нормам и вносить необходимые изменения в технологический процесс.

УДК 681.586.772

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕНСОРА ОТКРЫТОГО ТИПА

Джежора А.А., проф., Завацкий Ю.А., ст. преп., Коваленко А.В., ст. преп.,  
Статковский Н.С., ст. преп.

Витебский государственный технологический университет,  
г. Витебск, Республика Беларусь

**Ключевые слова:** датчик, моделирование, сенсор, зона контроля.

Реферат. В работе строится математическая модель сенсорного датчика открытого типа. Созданная модель позволяет проводить обоснованный выбор конструкции и параметров датчика, определяет метрологические характеристики измерительного устройства, решать вопрос технической осуществимости поставленной задачи. Присутствие экрана над контролируемым объектом в области критической толщины контролируемого материала приводит к потере чувствительности датчика к диэлектрической проницаемости или двусмысленности результата измерения. Показывается, что для устранения эффекта двойственности измерения необходимо проводить за пределами аномальной области.

Емкостные сенсоры используют в неразрушающем контроле физических, физико-механических свойств материалов, таких как влагосодержание, пористость, влажность, плотность. Конструкция сенсора открытого типа представляет собой многосекционный накладной измерительный конденсатор, электроды которого расположены на диэлектрической подложке (рис. 1).

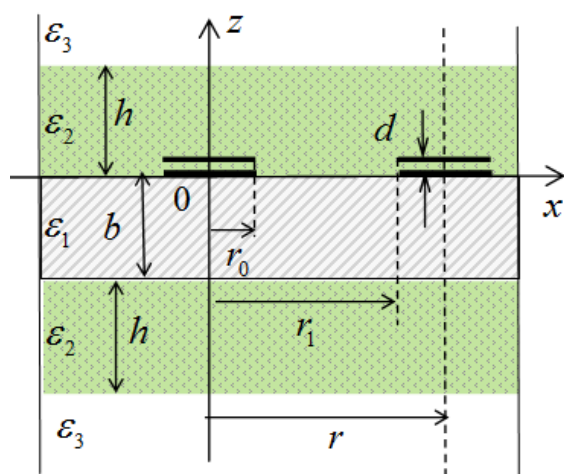


Рисунок 1 – сенсор открытого типа

Электрическое поле, создаваемое высокопотенциальными электродами 1, проникая через материал, замыкается на низкопотенциальных электродах 2. Поле не ограничено в пространстве [1]. Одним из возможных способов оценки глубины зоны контроля является изучение того, насколько глубоко электрическое поле проникает в контролируемую среду, посредством математического моделирования. Координата  $z$ , в которой достигается 97 % асимптотической емкости сенсора, определяется как глубина зоны контроля [2]. Изменяя геометрические размеры электродов, можно повлиять на глубину зоны контроля сенсора, его чувствительность, динамический диапазон и уровень сигнала. Практическое исполнение сенсора показывает, что, несмотря на ряд математических моделей, существуют несоответствия между расчетными и измеренными значениями импедансов. Самыми важными вкладчиками, приводящими к несоответствиям между расчетами и реальными измерениями, являются толщина электродов. Эти несоответствия усиливаются, если толщина подложек  $b$  имеет размеры сравнимые с межэлектродными зазорами  $\Delta r = r_1 - r_0$ . Несоответствия между расчетными и измеренными значениями импедансов затрудняют интерпретацию полученных результатов, снижают эффективность емкостного способа контроля.

Цель работы заключается в повышении точности расчета параметров многосекционного сенсора открытого типа, оптимизации конструктивных параметров, таких как глубина зоны контроля, сила сигнала и так далее.

Математическая модель учитывала следующее:

- основанием подложки служит изотропный однородный материал;
- материал подложки не обладает проводимостью;
- материал подложки не обладает гидрофобными свойствами;
- линейные размеры сенсора во много раз меньше длины волны электромагнитного поля;
- длина электродов намного больше их поперечных размеров;
- граница раздела слоев совпадает с плоскостью электродов или с поверхностью силовых линий, или эквипотенциалей.

Реакция поля чувствительных элементов сенсора (электродов) на объекты, вносимые в поле, зависит от ближайшего окружения. Наибольшие изменения происходят под влиянием самого близкого слоя, расположенного у электродов, – подложки. Для стороны электрода, обращенной к подложке, поверхностная плотность заряда иная, чем на стороне электрода, обращенной к контролируемому материалу.

Поверхностную плотность зарядов на стороне электрода, обращенной к контролируемому материалу (верхняя пара электродов) обозначим –  $\sigma_k(x)$ , на стороне электрода, обращенной к подложке –  $\tau_k(x)$ . Индекс  $k=1$  соответствует поверхностной плотности заряда на высокопотенциальных электродах,  $k=2$  – на низкопотенциальных электродах. Очевидно, в силу симметрии имеет место и электрическая симметрия:  $\sigma_k(x) = \sigma_k(-x)$ ;  $\tau_k(x) = \tau_k(-x)$ ;  $k=1,2$ .

Положим, что система зеркально-симметричных электродов (в соответствии с рисунком 1) находится в трехслойной среде:

$$\begin{cases} \varepsilon_3, & \text{если } b + \mu + h_1 \leq x \leq b + \mu + h_1 + h; \\ \varepsilon_2, & \text{если } b < x \leq b + \mu + h_1; \\ \varepsilon_1, & \text{если } 0 \leq x \leq b. \end{cases}$$

Наведенные на границе раздела слоев связанные заряды учтем, используя метод зеркальных отображений [3]. Согласно этому методу наведенные связанные заряды заменяются сосредоточенными зарядами, отраженными от границы раздела слоев. Эти заряды рассчитываются через коэффициенты пропускания  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{21}$  при переходе поля из первой среды во вторую, и наоборот, коэффициенты отражения  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{21}$  на границе раздела первой среды со второй и, наоборот [3]:

$$\beta_{12} = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad \beta_{21} = \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad \lambda_{12} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad \lambda_{21} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Аналогичным образом рассчитываются коэффициенты и на границе раздела второй и третьей среды. Поле над подложкой создается не только зарядами нижней, верхней пары сенсора, но и их отражениями. Из-за громоздкости выражений для потенциалов точек на поверхностях электродов, в статье приводится лишь частный случай для потенциала на поверхности электродов, обращенной к контролируемому диэлектрику. С учетом суперпозиции полей всех зарядов выражение для потенциала при  $0 \leq x_j \leq r_0$ ,  $r_1 \leq x_j \leq r$ ,  $z = b + \mu$  примет вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^Z \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_{j1}(t) \ln \left| (2rm \pm t)^2 - x_j^2 \right| dt + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=0}^Z \frac{\lambda_{21}}{2} \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \sigma_k(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + 4\mu^2 \right| dt + \\ & + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=0}^Z \frac{1}{2} \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \tau_k(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + \mu^2 \right| dt + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=0}^Z \frac{\lambda_{21}}{2} \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \tau_k(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + \mu^2 \right| dt = -\varepsilon_2 \varepsilon_0 2\pi V_k, \end{aligned}$$

где координаты точек на электродах определяются выражениями:  $x_j = (\alpha_j + \beta_j)/2$ .

Такие же выражения записывались и для нижней поверхности электродов. С учетом, что общий заряд сенсора равен нулю, составляется система интегральных уравнений. Решение системы интегральных уравнений дает значения функций распределения поверхностных

зарядов  $\sigma_k(x)$ ,  $\tau_k(x)$ . Межэлектродная емкость  $C_{12}$ , на единицу длины электродов определяется выражением:

$$C_{12} = \left( \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} \sigma_{i2} l_i + \sum_{i=n_1+n_2+n_3+1}^{n_1+n_2+n_3+n_4} \tau_{i2} l_i \right) / (V_1 - V_2).$$

где  $l_i = \beta_i - \alpha_i$

Проверка адекватности модели реальным конструкциям проводилась на датчиках с металлизацией 0,5 (отношение площади электродов к полной площади датчика). Электроды вытравливали на двустороннем фольгированном тефлоне (PTFE) толщиной 1 мм. Толщина медного покрытия составляла 35  $\mu\text{м}$ . Ширина потенциальных электродов  $2r_0 = 2$  мм и число секций  $n = 6$ . Погрешность расчета  $\delta C = 2,5\%$ .

Результаты моделирования электрического поля для трехслойной среды  $\epsilon_1 = 2,3$ ,  $\epsilon_2 = 3$ ,  $\epsilon_3 = 1$  представлены на рисунке 2. На рисунке 3 результат расчета поверхностной плотности заряда на электродах сенсора.

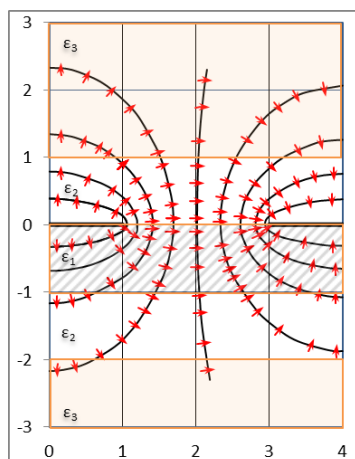


Рисунок 2 – Стрелки напряженности и эквипотенциальные линии электрического поля для сенсора с  $b = 1$  мм и  $r = 4$  мм

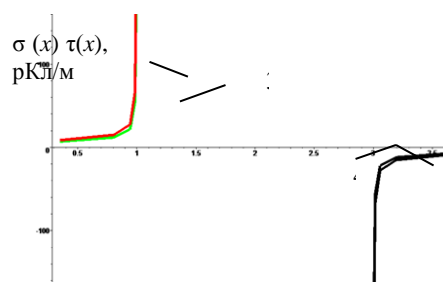


Рисунок 3 – Распределение поверхностной плотности заряда на электродах: 1, 2 – со стороны контролируемого диэлектрика; 3, 4 – со стороны подложки

Созданная модель позволяет проводить обоснованный выбор конструкции и параметров сенсора, определяет метрологические характеристики измерительного устройства, решает вопрос технической осуществимости поставленной задачи. Справедливость модели подтверждена экспериментальными измерениями емкости  $C_{12}$ . Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Датчик» (№ 201630064).

#### Список использованных источников

1. Xiaobei B. Li, Sam D. Larson, Alexei S. Zyuzin, and Alexander V. Mamishev “Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors,” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 6. № 2, 2006. pp. 434 – 440.
2. Kim C. et al. Numerical analysis on effective electric field penetration depth for interdigital impedance sensor //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2013. – Т. 418. – №. 1. – С. 012020.
3. Нетушил, А. В. Расчет потенциальных полей / А. В. Нетушил // Труды МЭИ, 1951. – Вып. 9. С. 3–25.