

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАКЛАДНОГО ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ С ДВУМЯ КОМПЛАНАРНЫМИ ПЛАСТИНЧАТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

А.К. ХУРЦИЛАВА, К.Д. ТУХАРЕЛИ

Кутаисский государственный университет им. Ак. Церетели

В.Н. ПАВЛЕНКО

Киевский национальный университет технологий и дизайна

В работе рассматривается вопрос определения зоны контроля поверхностного накладного датчика влажности с двумя компланарными пластинчатыми электродами. Установлено, что наибольшей скоростью убывания чувствительности обладает датчик с двумя компланарными электродами из плоских пластин, а наименьшей – датчик с уединенным дисковым электродом. Выявлено, что чувствительность датчиков в плоскости, параллельной поверхности материала также неравномерна, но имеет немонотонный характер

Неразрушающий экспрессный контроль влажности и плотности материалов, ограждающих конструкций предусматривает односторонний доступ к поверхности контролируемого материала, имеющего свои особенности. Применяемые при этом электроемкостные преобразователи (датчики) накладного типа создают в материале неравномерное поле, напряженность которого монотонно убывает по мере удаления слоя материала от поверхности. Неравномерность поля по объему изделия приводит к тому, что чувствительность датчика к свойствам слоев материала, находящихся на разном удалении, неодинакова и, следовательно, участки контролируемой среды оказывают различное влияние на результат измерения, который можно рассматривать как усредненный в определенном объеме материала.

Кроме того, если при разрушающих испытаниях (двусторонний доступ) точно известен объем контролируемой среды, то при одностороннем доступе границы участка контролируемого объекта материала можно указать лишь условно, за счет чего возникает дополнительная погрешность для объектов с размерами, сравнимыми с размерами зоны контроля датчика [1].

В модификациях приборов измерения и регулирования влажности все чаще применяются так называемые односторонние емкостные датчики – с электродами, расположенными в одной плоскости. Эти датчики создают в материале рабочее электрическое поле, параметры которого зависят от напряжения на электродах, их геометрических размеров и взаимного размещения. Сближение электродов увеличивает напряженность поля, однако уменьшает глубину его проникновения в материал, что сказывается на чувствительности влагомеров и объеме получаемой информации.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются материалы ограждающих конструкций. Из современных физических методов измерения и контроля влажности материалов ограждающих конструкций наибольшее практическое применение находит диэлькометрический метод измерения влажности материалов.

Для решения поставленной задачи нами использована комплексная методика исследований, включающая литературный обзор, патентный поиск, анализ достижений в данной области.

Постановка задачи

Целью данной работы является определение зоны контроля поверхностного накладного датчика влажности с двумя компланарными пластинчатыми электродами.

Результаты и их обсуждение

Исследуем зону контроля распространенной в диэлектрике конструкции, представляющей собой систему электродов из двух компланарных плоских пластин (рис.1). Напряженность поля в такой системе электродов определяется по формуле [1,2]:

$$\frac{E}{E_0} = \left\{ \left[(xc - a)^2 + y^2 \right] \left[(x + a)^2 + y^2 \right] \left[(x - b)^2 + y^2 \right] \left[(x + b)^2 + y^2 \right] \right\}^{-\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

где $E_0 = \frac{(a+b)\varphi_0}{2K_1(K^1)}$; $(b - a)$ ширина электродов; $2a$ – расстояние между ними; φ_0 – напряжение между электродами; $K_1(K^1)$ – полный эллиптический интеграл 1-го рода с модулем

$$K^2 = \left(\frac{b-a}{b+a} \right)^2, \quad K^2 = 1 - K^2.$$

Зависимость относительной емкости между пластинами от толщины слоя материала y с учетом уравнения (1) запишем так:

$$C_{отн}(y) = \frac{C(y)}{C_\infty} = \frac{\varepsilon}{aC_\infty} \int_0^y S_y(y) dy, \quad (2)$$

где посылонная чувствительность датчика

$$S_y(y) = \frac{a}{L\varepsilon} \cdot \frac{\partial C(y)}{\partial y} = \left[\frac{1 + b/a}{K_1(K^1)} \right]^2 \int_0^\infty \frac{d\xi}{\sqrt{u}}; \quad (3)$$

$u = \left[(\xi - 1)^2 + g^2 \right] \left[(\xi + 1)^2 + g^2 \right] \left[\left(\xi - \frac{b}{a} \right)^2 \right] \left[\left(\xi + \frac{b}{a} \right)^2 + g^2 \right]$ – вспомогательная безразмерная функция;

$\xi = x/a$, $g = y/a$ – безразмерные координаты.

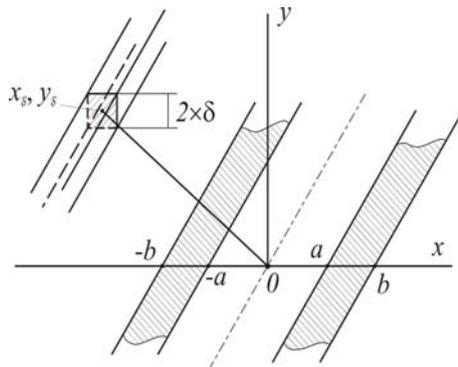


Рис.1. К расчету конденсаторной емкости датчика влажности с электродной системой из двух компланарных пластин

Полная (погонная на единицу длины L пластин) емкость компланарного датчика с пластинчатыми электродами, определяемая всей толщиной материала ($v=\infty$), состави:

$$C_{\infty} = \frac{\varepsilon}{a} \int_0^{\infty} S_y(y) dy . \quad (4)$$

Объемная и радиальная чувствительность такого датчика будут определяться следующими выражениями:

$$S_v(x, y) = \frac{a^2}{\varepsilon} \frac{\partial C}{\partial V} = \left[\frac{1 + b/a}{K_1(k^1)} \right]^2 \frac{1}{\sqrt{u}} ; \quad (5)$$

$$S_x(x) = \frac{a}{L\varepsilon} \frac{\partial C}{\partial x} = \left[\frac{1 + b/a}{K_1(K^1)} \right]^2 \int_0^{\infty} \frac{d\vartheta}{\sqrt{u}} . \quad (6)$$

Зависимость относительной емкости компланарного датчика от относительной толщины слоя материала $C_{отн} (y/a)$ была получена численным интегрированием уравнения (3). Для этого была разработана специальная программа вычисления несобственных интегралов с бесконечным верхним пределом. Программа предусматривает на каждом шагу интегрирование по квадратурной формуле Гаусса с двумя узлами, причем каждый следующий шаг больше предыдущего в $v>1$ раз: $\Delta y_{i+1} = \Delta y_i v$ т.е.шаги возрастают в геометрической прогрессии, начиная с начального h_0 : $y_i = y_0 + h_0 + h_0 v + h_0 v^2 + \dots + h_0 v^{i-1} = y_{i-1} + h_0 v^{i-1}$. Такой подход справедлив тем, что подинтегральная функция $1/\sqrt{u}$ быстро падает с ростом u и на бесконечности ведет себя как $\frac{1}{\sqrt{u}} \approx \frac{1}{y^4}$, что обеспечивает хорошую сходимость интеграла уравнения (3). Зависимость относительной емкости датчика от толщины для случая $b/a=2$ приведена на рис.2.

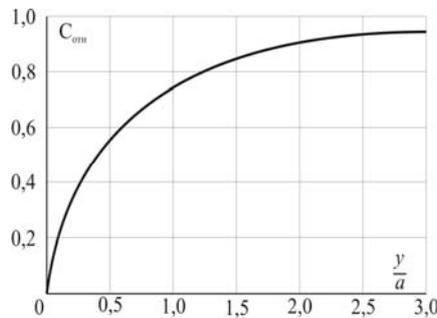


Рис.2. Зависимость относительной емкости датчика с компланарными электродами от глубины слоя в материале

Из нее следует, что глубина зоны контроля ГЗК, рассматриваемого датчика по уровню относительной емкости $C_{отн} = 0,5; 0,8$ и $0,9$, составляет соответственно $y_{гзк} = 0,4; 1,2; 2$ т.е. ГЗК для $C_{отн} = 0,9$ равна расстоянию между пластинами $2a$. Таким образом, ГЗК компланарного датчика несколько меньше, чем у датчиков с кольцевым электродом (при одинаковых размерах $R_2=2a$).

На рис 3 – 6 приведены зависимости относительных посылкой $S_y (y)$, радиальной $S_x(x)$ и объемной $S_{v,\delta}(x,y)$ чувствительностей компланарного датчика, причем для последней показано изменение $S_{v,\delta}(x,y)$ в трех плоскостях, параллельных от нее на расстояниях на $=0; 0,035$ и $0,1$ (кривые 1,2 и 3 соответственно).

Из этих зависимостей следует, что так же, как у кольцевых датчиков, у компланарного плоского датчика послойная чувствительность S_y быстро убывает с глубиной в контролируемом материале (рис. 3), а объемная S_v и радиальная S_x чувствительности имеют всплески на краях электродов при $x/a = 1$ и $x/a = 2$. На рис. 4 – 6 приведены для сравнения объемная S_v и интегральная объемная S_δ чувствительности, последняя рассчитана для элемента объема имеющего в рассматриваемой системе координат (рис. 1) сечение в виде квадрата со стороной δ . Зависимость $S_\delta(x,y)$ дана $\delta/a=0,1$ и плоскостей, отстоящих от поверхности на расстоянии $y/a=0;0,1$. Из сравнения объемных чувствительностей S_v и S_δ следует, что последняя имеет меньшую крутизну и конечные всплески на краях электродов.

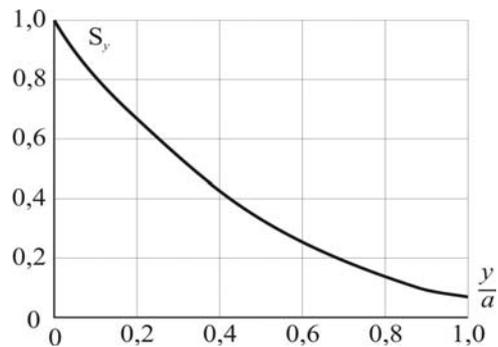


Рис. 3. Зависимость послойной чувствительности компланарного датчика влажности от глубины слоя в контролируемом материале

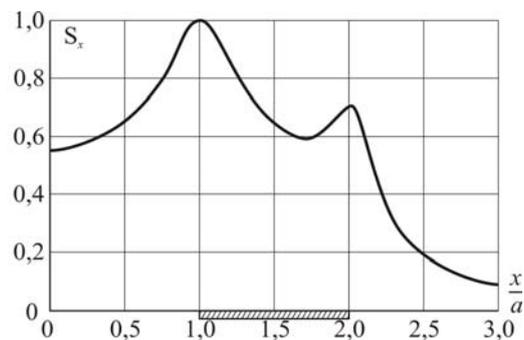


Рис. 4. Зависимость радиальной чувствительности датчика влажности от координаты в плоскости компланарных электродов

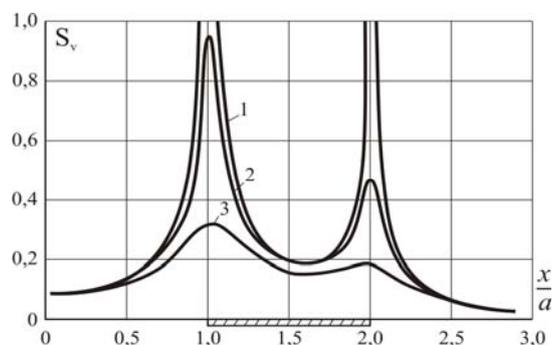


Рис. 5. Изменение объемной чувствительности в плоскостях, параллельных плоскости электродов компланарного датчика

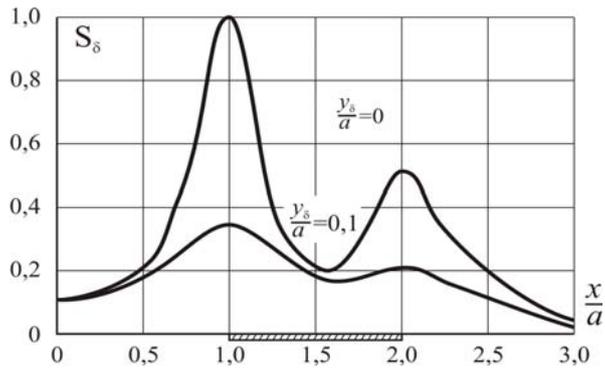


Рис.6.Изменение объемной (интегральной) чувствительности в плоскостях, параллельных плоскости электродов компланарного датчика

Для получения аналитических зависимостей параметров компланарного датчика от его конструкции (ширины электродов $b-a$ и расстояния между ними $2a$), используем приближенные выражения для его относительной емкости [3]

$$C_{отн}(x) = \sqrt{\frac{1 - (a/x)^2}{1 - (a/b)^2}}, \quad (7)$$

Определяющей долю рабочей емкости, приходящуюся на область поля, ограниченную снаружи силовой линией, соединяющей через толщину материала точки x и $-x$. Для точки y , лежащей на оси симметрии датчика, через которую проходит эта силовая линия:

$$y(x) = a \sqrt{\frac{(x/a)^2}{1 - (x/b)^2}}. \quad (8)$$

С учетом (7) и (8) получим выражение для глубины зоны контроля компланарного датчика:

$$y_{ГЗК} = a \sqrt{\frac{C_{отн}^2}{1 - C_{отн}^2}}, \quad (9)$$

Откуда следует, что ГЗК компланарного датчика пропорциональна расстоянию между внутренними краями электродов. Для рассмотренной конструкции датчика ($b/a=2$) (9) дает для глубины зоны контроля по уровню $C_{отн} = 0,8$, $y_{ГЗК} = 1,33a$ и $y_{ГЗК} = 2,06a$ для $C_{отн} = 0,9$, что близко к значениям $y_{ГЗК}$, полученным численным расчетом по (2) (рис. 2)

Выводы

На основании приведенных теоретических исследований и расчетов параметров датчиков и их зоны контроля можно сделать следующие выводы:

- чувствительность емкостных датчиков рассмотренных конструкций максимальна на поверхности материала и монотонно уменьшается по его толщине, причем наибольшей скоростью убывания чувствительности обладает датчик с двумя компланарными электродами из плоских пластин, а наименьшей – датчик с уединенным дисковым электродом;

- чувствительность датчиков в плоскости, параллельной поверхности материала (радиальная чувствительность), также неравномерна, но имеет немонотонный характер, причем пик радиальной чувствительности находится у краев электрода, а амплитуда пика уменьшается при увеличении расстояния от рассматриваемой плоскости (слоя) до поверхности материала;

– основной вклад в емкость датчика (90% от полной) вносит поверхностный слой материала толщиной, равной 1,3 наружного диаметра электрода (для датчиков с кольцевым или дисковым электродом) или межэлектродному расстоянию (для датчиков с компланарными пластинчатыми электродами).

ЛИТЕРАТУРА

27. Матис И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. – Рига: Зинане, 1982, 304 с.
28. Сочнев А.Я. Расчет напряженности поля прямым методом. – Л.: Энергоатомиздат. 1984, – с.112
29. Бугров А.В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. – М.: Машиностроение, 1982. – с.92.

Надійшла 12.12.2008