

Об оценке погрешностей измерений емкостными датчиками планарной конструкции

В. С. РОЙФЕ

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия, e-mail: roife@mail.ru

Приведены и проанализированы факторы, влияющие на инструментальную погрешность измерений емкостными датчиками планарной конструкции. Даны рекомендации по минимизации влияния этих факторов.

Ключевые слова: емкостные датчики, компланарные электроды.

The factors governing the value of instrumental error of measurements by planar construction capacitive sensors are presented and analysed. The recommendations on minimizing of these factors impact are given.

Key words: capacitive sensors, coplanar electrodes.

Емкостные датчики используют в физико-химических измерениях во многих отраслях народного хозяйства для получения качественной и количественной информации о составе и свойствах веществ и материалов. Вопросы разработки, расчета параметров и применения датчиков различных конструкций рассмотрены в ряде публикаций, например [1—4].

Одними из расчетных параметров емкостных датчиков являются характеристики рабочей (геометрической) емкости. Точные и приближенные аналитические выражения расчета этих характеристик для датчиков, рассматриваемых в статье, наиболее полно приведены в [3]. Электродная система датчиков планарной конструкции, используемых для определения, например, влажности материала, выполнена в виде одного или нескольких концентрических кольцевых электродов, расположенных на диэлектрическом основании в одной плоскости. Такая конструкция дает возможность проводить измерения при одностороннем доступе к объекту контроля и оперативно сканировать его поверхность. Электрическое поле, которое создается в контролируемом материале, неравномерно, так как его напряженность быстро убывает по толщине объекта контроля [5]. В этом случае электроды датчика находятся на границе двух сред — контролируемого материала и диэлектрического основания датчика. Диэлектрическая проницаемость ϵ основания постоянна, в то время как ϵ материала может меняться в широких пределах, поэтому точный расчет параметров рабочей емкости датчика с использованием формул из [3] становится проблематичным. На практике такой расчет для планарного датчика проводят по формуле для однородной среды и при необходимости уточняют полученный результат экспериментальным путем, для чего рабочую поверхность поочередно приводят в соприкосновение с двумя эталонными жидкостями с существенно разными значениями ϵ , например, дистиллированной водой $\epsilon_1 = 81$ и ацетоном $\epsilon_2 = 21,4$. Рабочую емкость датчика определяют как

$$C_p = (C_{x1} - C_{x2})/(\epsilon_1 - \epsilon_2),$$

где C_{x1} , C_{x2} — измеренные емкости датчика на воде и ацетоне, соответственно.

Основное требование в отношении емкостных датчиков, применяемых при количественном определении какого-либо физического свойства вещества, предъявляется к чувствительности

$$S = \partial C_x / \partial y = C_p \partial \epsilon / \partial y,$$

где y — определяемое свойство.

Очевидно, что с увеличением C_p чувствительность датчика будет пропорционально расти, однако при этом возрастает и влияние неконтролируемых мешающих факторов, в первую очередь, удельной электропроводности материала.

В [6] приведено решение задачи аналитической оценки изменения чувствительности емкостных датчиков планарной конструкции, где помимо указанной выше чувствительности введены понятия локальных чувствительностей в трехмерном пространстве: объемной, радиальной и послойной, которые определяются соответственно как

$$S_V(r, z) = \frac{\partial C_{\text{отн}}}{\partial V} = \frac{\epsilon}{\phi_0^2 C_\infty} E^2(r, z) = E^2(r, z) / \left(4\pi \int_0^\infty \int_0^\infty E^2 r dr dz \right);$$

$$S_r(r) = \frac{\epsilon}{\phi_0^2 C_\infty} \int_0^\infty E^2(r, z) dz = \int_0^\infty E^2 dz / \left(4\pi \int_0^\infty \int_0^\infty E^2 r dr dz \right);$$

$$S_z(z) = \frac{\partial C_{\text{отн}}}{\partial z} = \frac{4\pi\epsilon}{\phi_0^2 C_\infty} \int_0^\infty E^2(r, z) r dr = \int_0^\infty E^2 r dr / \left(\int_0^\infty dz \int_0^\infty E^2 r dr \right),$$

где r , z — координаты любой точки объема V в цилиндрической системе координат; ϕ_0 — потенциал электрода; E — напряженность электрического поля.

Помимо основных параметров емкостных датчиков, существенное влияние на результаты измерений оказывают паразитные параметры: емкости диэлектрического основания, на котором закреплена электродная система датчика, и соединительных проводов; входная емкость измерительной схемы; распределенная индуктивность электродной системы и соединительных проводов. Таким образом, чем меньше отношение суммарной паразитной емкости к рабо-

чей емкости датчика, тем больше его чувствительность и точность измерений при равных условиях. Кроме того, при частоте электрического поля более 10^7 Гц и удельной электропроводности контролируемого вещества более 1 См/м существенное влияние на результаты измерений оказывает распределенная (паразитная) индуктивность. Это обстоятельство необходимо учитывать вопреки распространенному мнению, что паразитной индуктивностью можно пренебречь ввиду ее малости. На рис. 1 приведена эквивалентная схема замещения емкостного датчика, включенного в колебательный контур резонансной или автогенераторной схемы, с учетом распределенной индуктивности и без нее. Резонансная частота контура, изображенного на рис. 1, а, выражается формулой

$$\omega = \left[\sqrt{L_k (C_0 + C_x)} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где L_k — сосредоточенная индуктивность контура; C_0 — начальная емкость контура; C_x — измеряемая емкость датчика с материалом.

Резонансная частота контура на рис. 1, б в общем виде определяется сложной, громоздкой и неудобной для анализа формулой. Поэтому рассмотрим два граничных частных случая, для которых эта формула достаточно проста. В обоих случаях $L_p \ll L_k$, L_p — распределенная индуктивность. В первом случае эквивалентное сопротивление R_x потерь электропроводности материала достаточно велико, т. е. $R_x \gg (\omega C_x)^{-1}$. В этом случае

$$\omega = \left[\sqrt{(L_k + L_p)(C_0 + C_x)} \right]^{-1}, \quad (2)$$

и, учитывая, что $L_p \ll L_k$, получаем совпадение формул (1) и (2). Следовательно, L_p действительно не влияет на результаты измерений. Во втором случае R_x достаточно мало, т. е. $R_x \ll (\omega C_x)^{-1}$, и

$$\omega \approx \left[\sqrt{C_0 L_k L_p / (L_k + L_p)} \right]^{-1}.$$

С учетом $L_p \ll L_k$ запишем

$$\omega \approx \left[\sqrt{L_p C_0} \right]^{-1}. \quad (3)$$

В (3) нет информации о C_x и в данной ситуации влиянием паразитной индуктивности датчика на результаты измерений пренебречь нельзя.

Применительно к емкостным датчикам планарной конструкции существует еще один неконтролируемый мешающий фактор, оказывающий значительное влияние на погрешности измерений. Речь идет о поверхностном слое контролируемого материала. Как указывалось выше, чувствительность датчика с планарными электродами максимальна на поверхности контролируемого объекта и убывает по толщине (координата z). Неровности поверхности объекта в зоне контроля, являющиеся причиной непостоянства контакта датчика с материалом, неоднородность свойств материала по

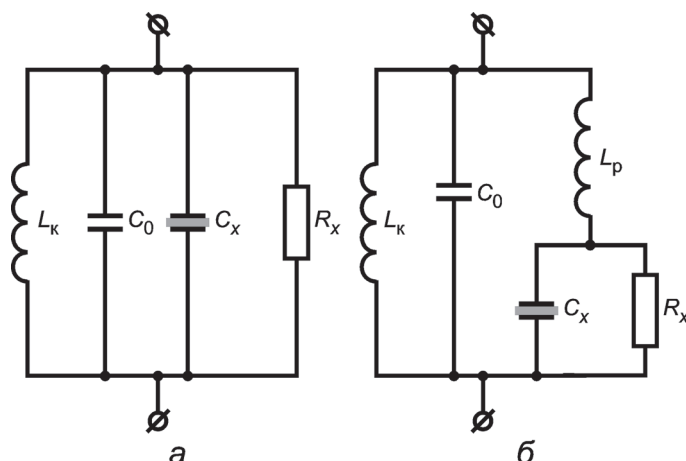


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения емкостного датчика: а — без учета распределенной индуктивности; б — с учетом распределенной индуктивности

толщине и т. д. приводят к появлению дополнительных случайных погрешностей измерений.

Известны различные конструктивные способы уменьшения этого влияния, например, создание постоянного искусственного воздушного зазора между электродами и поверхностью материала, подпружинивание электродов, введение дополнительного электрода эквипотенциальной защиты и др. [2]. Однако на практике эти приемы радикально не уменьшают дополнительную погрешность, обусловленную качеством и свойствами поверхностного слоя материала. На рис. 2, а показано распределение силовых линий емкостного датчика с дополнительным электродом 2 эквипотенциальной защиты. Наличие на нем такого же потенциала, как и на основном высокопотенциальном электроде 1, ослабляет влияние поверхностного слоя вследствие того, что часть силовых линий, проходящих через слой, замыкается на электрод 2, а не на 1, и в выходной информации датчика, снимаемой с электродов 1, 3, доля поверхностного слоя уменьшается.

Ниже описан способ, позволяющий существенно уменьшить влияние поверхностного слоя материала на результаты измерений [7]. Основная его идея заключена в том, что на

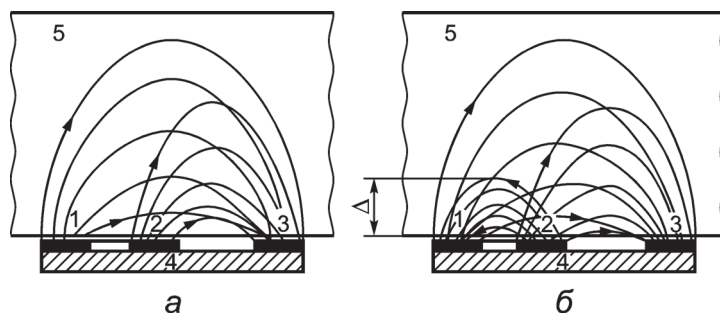


Рис. 2. Распределение силовых линий трехэлектродного емкостного датчика с эквипотенциальной защитой (а) и в предложенном способе (б): 1, 2 — основной и дополнительный высокопотенциальные электроды; 3 — низкопотенциальный (нулевой) электрод; 4 — основание датчика (диэлектрик); 5 — материал; Δ — толщина поверхностного слоя материала

электрод 2 подают потенциал бóльший, чем на измерительный электрод 1. В этом случае между электродами 1, 2 возникает дополнительное электрическое поле, силовые линии которого направлены навстречу силовым линиям основного поля между нулевым 3 и измерительным 1 электродами. При этом вследствие суперпозиции полей (физически существует одно поле) происходит частичная компенсация основного поля дополнительным встречным. Так как глубина проникновения основного и дополнительного полей различны и они противофазные, то в слое материала определенной толщины поле отсутствует. Соотношение между глубинами проникновения этих полей зависит, в первом приближении, от отношения расстояний между соответствующими парами электродов. Сущность компенсации полей в поверхностном слое материала поясняется на рис. 2, б. На измерительный электрод подается потенциал φ_1 от измерительной схемы, на защитный электрод — потенциал $\varphi_2 > \varphi_1$, а на нулевом электроде потенциал $\varphi_3 = 0$. При этом разности потенциалов $U_1 = \varphi_1 - \varphi_3$, $U_2 = \varphi_2 - \varphi_3$ имеют одну и ту же частоту и фазу. Основное электрическое поле, создаваемое в материале между электродами 1, 3, имеет сравнительно большую глубинность, определяемую расстоянием между электродами. Дополнительное электрическое поле, создаваемое в материале между электродами 2, 1, имеет сравнительно малую глубинность, зависящую от расстояния между ними. Основное и дополнительное поля направлены встречно $\varphi_2 > \varphi_1$, поэтому в поверхностном слое материала толщиной Δ вследствие суперпозиции полей происходит их взаимная компенсация и поле практически отсутствует, т. е. этот слой не вносит никакого вклада в измеряемую емкость. Регулируя напряжение U_2 , изменяют напряженность дополнительного встречного поля, что позволяет менять в некоторых пределах глубинность встречного поля, при этом будет изменяться толщина Δ слоя, в котором поле отсутствует. Изменяя емкость между измерительным и нулевым электродами, получают результаты, не зависящие от свойств поверхностного слоя материала толщиной Δ и качества его поверхности.

Для экспериментальной проверки предложенного способа измерений емкости были изготовлены два идентичных трехэлектродных датчика компланарной конструкции наружным диаметром нулевого электрода 150 мм. Датчики поочередно подключали через промежуточный преобразователь емкости в частоту к стандартному частотомеру. Промежуточный преобразователь — управляемый напряжением генератор (ГУН) с дополнительным устройством подачи на защитный электрод напряжения U_2 , частота и фаза которого совпадают с напряжением на измерительном электроде U_1 , а амплитуда регулируется в пределах $U_2 = (1,0...1,25)U_1$.

Эксперименты проводили на образцах легких и ячеистых бетонов размером 150×150×150 мм с влажностью 8—25 % (по массе) и плотностью 1200—500 кг/м³. Образцы предварительно выдерживали во влагоизоляции до равномерного распределения влаги по толщине. Одна из сторон каждого образца была отшлифована. Провели три серии экспериментов: в первой — электроды датчиков непосредственно соприкасались с поверхностью образцов; во вто-

рой — между электродами и поверхностью образцов искусственно создавали воздушный зазор 0,2—1,0 мм, чем моделировали качество поверхности реальных изделий; в третьей — между электродами и поверхностью образцов прокладывали различные материалы (керамику, асбестоцемент) толщиной 6—12 мм, имитирующие разные свойства наружного слоя и основной толщи контролируемого материала.

В результате обработки экспериментальных данных были определены относительные погрешности измерений емкости, обобщение которых приведено в таблице.

Относительные погрешности измерений емкости

Контролируемый материал (плотность, влажность)	Поверхностный слой (качество поверхности)	Толщина поверхностного слоя, мм	Воздушный зазор, мм	Погрешность измерения трехэлектродным датчиком*, %	
				$U_2 > U_1$	$U_2 = U_1$
Керамзитобетон (1200 кг/м ³ , 8 %)	Керамическая облицовочная плитка	6	—	5	32
	—	—	0,2—1,0	2—5	9—32
Газобетон (500 кг/м ³ , 8 %)	Асбестоцементный лист	8	—	9	45
	—	—	0,2—1,0	4—9	20—45

* Значения получены путем сравнения соответствующих результатов экспериментов второй и третьей серий с результатами первой серии.

Приведенные в таблице данные свидетельствуют, что погрешность измерения свойств основной массы материала, обусловленная качеством или свойствами поверхностного слоя из другого материала, может быть сведена к минимуму.

Литература

1. Матис И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1982.
2. Бугров А. В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. М.: Машиностроение, 1982.
3. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергоиздат, 1981.
4. Эме Ф. Диэлектрические измерения. М.: Химия, 1967.
5. Нетушил А. В. и др. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М., Л.: Госэнергоиздат, 1969. С. 169—174.
6. Ройфе В. С. Анализ чувствительности емкостных преобразователей влажности планарной конструкции // Измерительная техника. 2006. № 9. С. 67—70; Roife V. S. An analysis of the sensitivity of planar capacitive humidity converters // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 9. P. 946—951.
7. А. с. 1165967 СССР. Способ определения влажности / В. С. Ройфе, К. Д. Тухарели // Открытия. Изобретения. 1985. № 25.

Дата принятия 19.04.2013 г.