

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НАКЛАДНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА

Канд. техн. наук, доц. ДЖЕЖОРА А. А.

Витебский государственный технологический университет

Накладные измерительные конденсаторы (НИК) широко используют для контроля физических, физико-механических свойств материалов. На измерении импеданса, катализируемого ферментом, работают биодатчики. Они позволяют быстро и точно обнаруживать содержание глюкозы, мочевины в сыворотке [1]. В пищевой промышленности датчики контролируют процессы обезвоживания, стерилизации, замораживания пищи, производят оценку влагосодержания в органическом материале [2, 3]. С их

помощью осуществляются оценка качества жидких нефтепродуктов, контроль уровня топлива [4]. Применение электроемкостных датчиков настолько широко, что невозможно указать ту нишу, где бы они не использовались.

В статье рассмотрены накладные измерительные конденсаторы, защищенные от внешних агрессивных воздействий окружающей среды изоляционным покрытием, в основании подложек которых находится плоский заземленный электрод охраны (рис. 1). Присутствие

экранирующей плоскости в основании подложки приводит к глубоким количественным и качественным изменениям, а наличие электрода охраны в основании подложки – к возникновению виртуального электрода охраны в межэлектродном пространстве потенциальных электродов, уменьшению емкости НИК, изменению глубины зоны контроля. В то же время плоский электрод охраны в основании подложек может придавать конструкции жесткость, что крайне

важно при разработке датчиков уровня, работающих в условиях вибрации. Исследования в этой области [5–7] касались различных аспектов методологии контроля, включая моделирование электрических цепей, оптимизацию конструкций и оценку параметров датчика. Практическое выполнение датчиков на основе НИК показывает, что, несмотря на ряд математиче-

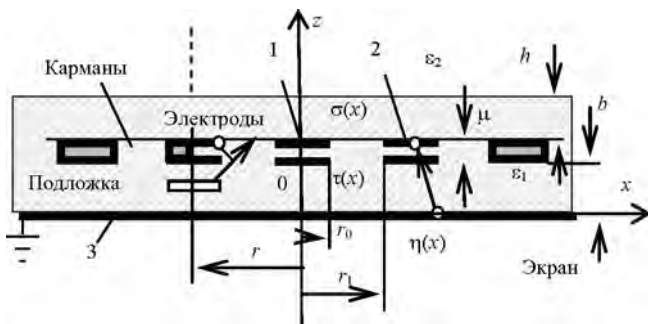


Рис. 1. Вид НИК в поперечном сечении

ских моделей [5–7], существуют несоответствия между теоретическими и измеренными значениями импедансов. Самыми важными вкладчиками, приводящими к несоответствиям между теоретическими моделями и реальными измерениями, являются толщина электродов, их длина и число. Несоответствия между теоретическими и измеренными значениями затрудняют интерпретацию полученных результатов, снижают эффективность электроемкостного способа контроля.

Цель данной статьи заключается в построении математической модели НИК, отражающей наиболее полно реальную картину контролируемых параметров, что позволяет на ее основе оптимизировать конструкцию НИК.

Секция НИК состоит из набора трех электродов, размещенных на общей подложке

(рис. 1). Потенциальные ленточные электроды 1, 2 размещены на подложке чередуясь и создают в окружающем пространстве плоскопараллельное поле. В основании подложки находится плоский электрод охраны 3. Низкопотенциальные электроды 2 и электрод охраны имеют практически одинаковый потенциал Земли V_2 . Будем полагать, что материал подложки не диспергирующий, т. е. диэлектрическая проницаемость подложки не является функцией частоты электромагнитного поля. Это допущение оправдано, потому что для частот, ниже 100 кГц, на которых в основном и происходят измерения, практически все диэлектрические материалы, например пластмассы, керамика и т. д., показывают незначительную дисперсию. Реакция электродов на материал, внесенный в поле датчика, зависит от ближайшего окружения. Наибольшие изменения происходят под влиянием самого близкого слоя, расположенного у электродов. Так как электроды имеют конечную толщину, распределение поверхностной плотности заряда для двух поверхностей одного и того же электрода различно. На поверхности электрода, обращенной к подложке, поверхностная плотность заряда иная, чем на поверхности электрода, обращенной к контролируемому материалу, в силу различных граничных условий. Воспользуемся тем, что поверхности электродов эквипотенциальны и поле внутри электродов отсутствует. Разделим электроды, представив каждый из них в виде двух зеркально-симметричных бесконечно тонких электродов, разнесенных в пространстве на расстояние, равное толщине реальных электродов μ (рис. 1). Разбиение электродов НИК приводит к системе зеркально-симметричного накладного измерительного конденсатора (ЗСНИК). Так как толщина электродов μ всегда на порядок меньше ширины электродов, поле внутри области, ограниченной поверхностями зеркально-симметричных одноименных электродов, также отсутствует. Поле выходит за пределы этой области и имитирует поле НИК, в том числе и в карманах, образованных реальными электродами. Положим, что система зеркально-симметричных электродов (рис. 1) находится в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Обозначим поверхностную плотность заря-

дов на стороне электрода, обращенной к контролируемому материалу (верхняя пара ЗСНИК) $\sigma_k(x)$, на стороне электрода, обращенной к подложке, $-\tau_k(x)$ и на электроде охраны $-\eta(x)$. Индекс $k = 1$ соответствует поверхностной плотности заряда на высокопотенциальных электродах, $k = 2$ – на низкопотенциальных электродах. Очевидно, в силу симметрии имеет место и электрическая симметрия:

$$\sigma_k(x) = \sigma_k(-x); \quad \tau_k(x) = \tau_k(-x);$$

$$\eta(x) = \eta(-x); \quad k = 1, 2.$$

Наведенные на границе раздела слоев связанные заряды учтем, используя метод зеркальных отображений. Согласно названному методу наведенные связанные заряды заменяются сосредоточенными зарядами, отраженными от границы раздела слоев. Эти заряды рассчитываются через коэффициент отражения λ_1 на границе раздела первой среды со второй и наоборот

$$\lambda_1 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}.$$

Поле над подложкой создается не только зарядами нижней, верхней пар ЗСНИК, их отражениями, но и наведенными зарядами электрода охраны. 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 от всех зарядов выражения для потенциалов точки на поверхности НИК для $0 \leq x_j \leq r_0$; $r_1 \leq x_j \leq r$; $z = b + \mu$ примут вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^2 \sum_{m=0}^Z \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \sigma_k(t) \ln \left| (2rm \pm t)^2 - x_j^2 \right| dt + \\ & + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=0}^Z \frac{\lambda_1}{2} \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \sigma_k(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + 4h^2 \right| dt + \\ & + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=0}^Z \frac{1}{2} \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \tau_k(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + \mu^2 \right| dt + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=0}^Z \frac{\lambda_1}{2} \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \tau_k(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + (\mu + 2h)^2 \right| dt + \\ & + \sum_{m=0}^Z \frac{1}{2} \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \eta(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + (b + \mu)^2 \right| dt + \\ & + \sum_{m=0}^Z \frac{\lambda_1}{2} \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \eta(t) \ln \left| (2rm \pm t \pm x_j)^2 + (b + \mu + 2h)^2 \right| dt = \\ & = -\epsilon_1 \epsilon_0 2\pi V_k, \end{aligned}$$

где координаты точек на электродах определяются выражением

$$x_j = \frac{\alpha_j + \beta_j}{2}.$$

Такие же выражения записываются для нижней поверхности электродов и экрана. С учетом того, что общий заряд датчика равен нулю, составляется система интегральных уравнений. Для численного решения системы интегральных уравнений промежутки интегрирования разбивался на участки, где искомые функции $\sigma_k(x)$, $\tau_k(x)$, $\eta(x)$, полагаем, принимают постоянные значения и выносятся за знак интеграла. Границы интегрирования для каждой пары электродов ЗСНИК записываются через геометрические прогрессии. Например, для верхней пары электродов ЗСНИК:

$$\begin{aligned} \beta_i &= r_0 \frac{1 - q_1^i}{1 - q_1^{n_1}}; \quad \alpha_i = r_0 \frac{1 - q_1^{i-1}}{1 - q_1^{n_1}}; \\ \beta_i &= r - r_0 \frac{1 - q_2^{i-n_1-1}}{1 - q_2^{n_2}}; \quad \alpha_i = r - r_0 \frac{1 - q_2^{i-n_1}}{1 - q_2^{n_2}}, \\ i &= 1, 2, 3, \dots, n_1 + n_2, \end{aligned}$$

где q_1, q_2 – знаменатели геометрической прогрессии; n_1, n_2 – число разбиений поверхностей верхней пары электродов.

Решение системы интегральных уравнений дает значения функций распределения поверхностных зарядов $\sigma_k(x)$, $\tau_k(x)$, $\eta(x)$. Межэлектродная емкость C_{12} на единицу длины электродов определяется следующим образом:

$$C_{12} = \frac{\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} \sigma_i l_i + \sum_{i=n_1+n_2+n_3+1}^{n_1+n_2+n_3+n_4} \tau_i l_i}{V_1 - V_2},$$

где $l_i = \beta_i - \alpha_i$; n_3, n_4 – число разбиений поверхностей нижней пары электродов.

Для расчета межэлектродной емкости C_{12} и потоков вектора напряженности электрического поля была создана программа на базе системы компьютерной математики MAPLE 10.

Проверка адекватности созданной модели реальным конструкциям проводилась на датчиках с различной металлизацией 0,50 и 0,60 (отношение площади электродов к полной площади датчика $2r_0/r$). Электроды были вытравлены на двустороннем фольгированном стеклотекстолите СТФ толщиной $b = 0,97$ мм. Толщина медного покрытия составляла от 20 мм. Рисунок электродов выполнялся с помощью программы Control Panel – EAGLE 5.0.0 Professional. Ширина потенциальных электродов $2r_0 = 6$ мм и число секций $n = 7$ во всех случаях были одинаковы. Чтобы учесть паразитные емкости на торцах электродов, выполнялись копии идентичных датчиков длиной электродов $L_1 = 249$ мм и $L_2 = 95$ мм. Разность емкостей датчиков, измеренных для различных длин электродов, отражает погонную емкость на длину электродов без учета краевых эффектов на торцах и позволяет проводить сравнения расчетных значений с практическими измерениями. Измерения емкости проводили с помощью измерителя иммитанса E 7–20 на частоте 1 кГц в экранированном ящике. Первоначально изоляция отсутствовала $h = 0$ и электроды находились в воздухе. Для датчика с металлизацией 0,60 емкость, вносимая торцами электродов, $C_t = 0,068$ пФ, для датчика с металлизацией 0,50 емкость, вносимая торцами электродов, $C_t = 0,15$ пФ. Для датчика с металлизацией 0,60 при длине электродов $L_1 = 249$ мм измеренная емкость с учетом краевого эффекта составила 4,435 пФ, расчетная – 4,415 пФ. Для датчика с металлизацией 0,50 при длине электродов $L = 90$ мм, измеренная емкость с учетом краевого эффекта составила 1,076 пФ, расчетная – 1,11 пФ. Затем датчик с металлизацией 0,50 и длиной электродов $L = 90$ мм покрывался слоем эпоксидной

смолы толщиной $h = 0,3$ мм. Измеренная емкость для этого датчика с учетом краевого эффекта составила 1,272 пФ, расчетная – 1,315 пФ. Видно, что во всех случаях погрешность расчета межэлектродной емкости C_{12} менее 4 %.

Размер секции, мм	$2r = 1$	$2r = 2,5$	$2r = 5$
Металлизация	0,396	0,469	0,476
Толщина электродов, мм	14	14	14
Экспериментальное значение C_{12} , пФ	2,663	1,536	0,935
Расчетное FEM (Ansoft) [6] C_{12} , пФ	2,769	1,591	0,895
Ошибка расчета, %	3,8	3,5	4,3
Расчетное с ЗСНИК C_{12} , пФ	2,718	1,482	0,924
Ошибка расчета, %	2,1	3,5	1,2

Созданная модель датчика сравнивалась с полуаналитической моделью НИК [7], не учитывающей толщину электродов. Результаты сравнения для электродов, выполненных на подложке из тефлона, представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что разность между расчетными и измеренными значениями межэлектродной емкости для предложенной модели снижается за счет учета реальной толщины электродов μ . Расхождения могут быть связаны с ошибкой измерения толщины электродов или нарушением прямоугольного профиля сечения электродов (рис. 1). Профиль сечения электродов овален и скорее напоминает трапецию, чем прямоугольник.

Таблица 1

Измеренные и вычисленные межэлектродные емкости C_{12} на единицу длины электродов

Накладные измерительные конденсаторы характеризуются сравнительно небольшими значениями рабочих емкостей, измеряемых в долях пикофард. Измерения емкостей такого порядка связаны с применением высокочувствительных измерительных схем. Улучшить метрологические характеристики аппаратуры можно за счет оптимизации первичного элемента – НИК. Для оптимизации НИК используем разработанную программу. Задача оптимизации будет заключаться в нахождении такой конструкции и таких размеров электродов, для которых обеспечивается максимальная чувствительность к измеряемому параметру. Для этого необходимо выбрать материал подложки, определить оптимальные толщину изоляционного

покрытия, размеры электродов и толщину подложки. Чаще всего в качестве подложки служит материал тефлон ($\epsilon_1 = 2,1$) либо полипропилен ($\epsilon_1 = 2,4$). Это связано с низкими гидрофобными свойствами названных материалов, они менее восприимчивы к влажности окружающей среды. Кроме того, малые значения диэлектрической проницаемости подложек оптимизируют чувствительность датчика к контролируемым материалам над плоскостью электродов.

Межэлектродная емкость C_{12} обусловлена потоком напряженности электрического поля над поверхностью электродов в зоне расположения контролируемой среды и потоками в изоляции, включая подложку. Потоки напряженности электрического поля в изоляции и подложки создают паразитную емкость C_n , присутствие которой снижает чувствительность датчика. Ее устранение возможно с помощью заземленного экрана в подложке. Поэтому при исследовании чувствительности НИК одним из варьируемых параметров является относительный размер толщины подложки $b/\Delta r$, где $\Delta r = r_1 - r_0$.

Для повышения чувствительности НИК необходимо увеличивать изменение емкости ΔC , вызванное контролируемой средой. Увеличение ΔC может быть достигнуто уменьшением толщины слоя изоляции h , а также увеличением ширины электродов $2r_0$. В силу этого вторым и третьим параметрами, влияющими на чувствительность НИК, являются толщина слоя изоляции h и ширина электродов $2r_0$. Проведем оптимизацию датчика на базе НИК в случае контроля жидких сред. В качестве жидкости выберем дизельное топливо ($\epsilon_3 = 2,2$), в качестве контролируемого параметра – уровень топлива. Толщину подложки $b = 0,97$ мм и толщину электродов $\mu = 0,02$ мм сохраним неизменными. Максимальной чувствительности датчика соответствует его полное погружение в топливо $L = 1000$ мм. Результаты расчета максимальной чувствительности датчиков $\Delta C/C_{12}$

в зависимости от относительной толщины подложки $b/\Delta r$ приведены на рис. 2.

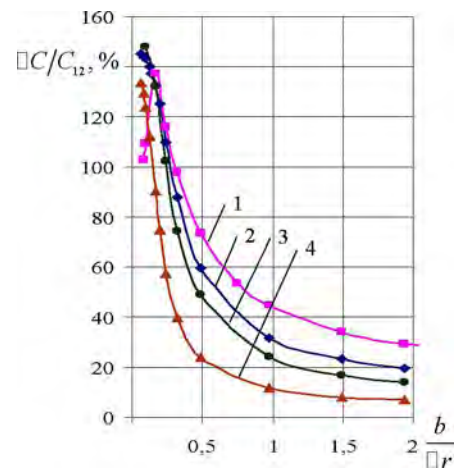


Рис. 2. Зависимость максимальной чувствительности датчика от относительной толщины подложки: 1 – тефлон, $h = 0,3$ мм, $r_0 = 2$ мм; 2 – СТФ, $h = 0,3$ мм, $r_0 = 2$ мм; 3 – СТФ, $h = 0,3$ мм, $r_0 = 1$ мм; 4 – СТФ, $h = b = 0,97$ мм, $r_0 = 2$ мм

Из кривых видно, что чувствительность датчика $\Delta C/C_{12}$, выполненного на подложке из тефлона, выше, чем у аналогичного датчика, выполненного на стеклотекстолите, в среднем на 10 %. Это связано с низкой диэлектрической проницаемостью тефлона. При увеличении толщины слоя изоляции h чувствительность датчика падает. Это хорошо иллюстрируют кривые 2 и 4, построенные для датчика, выполненного на стеклотекстолите. Увеличение ширины электродов (кривые 2 и 3) приводит к росту чувствительности, но вместе с этим происходит и увеличение поперечных размеров датчика.

Проследим, как изменяются потоки электрического поля в подложке с уменьшением ее относительной толщины $b/\Delta r$. Для этого воспользуемся теоремой Остроградского – Гаусса и вычислим алгебраическую сумму зарядов, расположенных на стороне высокопотенциального электрода, обращенной к подложке, и зарядов, расположенных на заземленном электроде:

$$\Delta N = \sum_{i=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} \tau_i l_i + \sum_{i=n_1+n_2+n_3+n_4+1}^{n_1+n_2+n_3+n_4+n_5} \eta_i l_i.$$

Алгебраическая сумма зарядов имеет размерность пКл/м, так как расчеты проводятся на единицу длины электродов. Если $\Delta N > 0$, то часть потока электрического поля, исходящая со стороны высокопотенциального электрода,

обращенного к подложке, замыкается на низкопотенциальный электрод и создает паразитную емкость в подложке. Когда знак суммы ΔN изменяется на противоположный, происходит трансформация поля и часть потока электрического поля, исходящая со стороны высокопотенциального электрода, обращенного к контролируемой среде, искривляясь замыкается на заземленный экран. Паразитная составляющая емкости C_{12} обращается в нуль. Это значение параметра $b/\Delta r$ следует считать отправной точкой для выбора оптимального соотношения толщины подложки b к межэлектродному зазору Δr . Из рис. 3 видно, что для всех прямых значение параметра $b/\Delta r$, когда знак ΔN изменяется на противоположный, находится вблизи 1,05. Этому моменту соответствует и значительное изменение скорости роста чувствительности датчика (рис. 2). Уменьшение относительной толщины подложки $b/\Delta r < 1,05$ увеличивает чувствительность датчика. Однако выбор относительной толщины подложки $b/\Delta r$ должен быть взвешенным. С уменьшением относительной толщины подложки $b/\Delta r$ снижается рабочая емкость датчика и увеличивается погрешность ее измерения. Если относительная толщина подложки уменьшается за счет увеличения межэлектродного зазора Δr , то происходит увеличение поперечного размера датчика, что не всегда возможно.

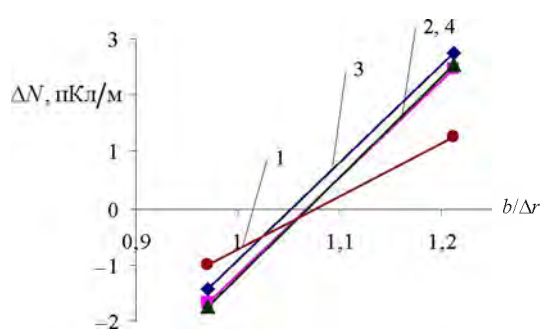


Рис. 3. Зависимость алгебраической суммы зарядов от относительной толщины подложки

ВЫВОД

Созданная модель накладного датчика позволяет учитывать толщину электродов, проводить оценку влияния геометрических параметров на основные характеристики датчика – рабочую и паразитную емкости, глубину зоны контроля, чувствительность к контролируемому параметру.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wah On Ho, S.** Electrochemical sensor for measurement of urea and creatinine in serum based on ac impedance measurement of enzyme-catalyzed, polymer transformation / S. Wah On Ho, C. J. Krause, Mc Neil // *Analytical Chemistry*. – 1999. – № 71. – P. 1940–1946.
2. **Gusepi-Elie, A.** Chemical and biological sensors based on electrically conducting polymers / A. Gusepi-Elie, G. G. Wallace, T. Matsue // *Handbook of Conductive Polymers 2nd Edition*. – Marcel Dekker, NY, 1998.
3. **Li, X. B.** Instrumentation and Inverse Problem Solving for Impedance Imaging. Ph.D. Dissertation, Department of Electrical Engineering, University of Washington Graduate School. – Washington, 2006.
4. **Датчик** для измерения уровня жидкости: пат. 2196966 РФ, МКИ G 01 F 23/26. Г. В. Медведев, В. А. Мипин, В. Н. Шивринский № 2001108624/28; заявл. 30.03.2001; опубл. 20.01.2003.
5. **Zaretsky, M. C.** Continuum Properties from Interdigital Electrode Dielectrometry / M. C. Zaretsky, L. Mouayad, J. R. Melcher // *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. – 1988. – Vol. 23, № 6. – P. 897–917.
6. **Mamishv, A. V.** Optimization of Multi-Wavelength Interdigital Dielectrometry Instrumentation and Algorithms / A. V. Mamishv, B. C. Lesieutre, M. Zahn // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 1998. – Vol. 5, № 3. – P. 408–420.
7. **Sheiretov, Y.** Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric / Y. Sheiretov, M. Zahn // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 2005. – Vol. 12, № 5. – P. 993–1004.

Поступила 12.02.2010