

УДК 53.082.722

КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ НА ТОРЦАХ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

канд. техн. наук, доц. А.А. ДЖЕЖОРА
(Витебский государственный технологический университет);
д-р техн. наук В.В. РУБАНИК
(Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск)

Электроемкостные датчики широко используются в неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов, в определении геометрических размеров объектов. Практика выполнения датчиков показывает, что, несмотря на ряд математических моделей, существуют несоответствия между расчетными и измеренными значениями импедансов. Несоответствия между теоретическими и измеренными значениями импедансов, вызваны в первую очередь краевыми эффектами на краях электродов. Они затрудняют интерпретацию полученных результатов, снижают эффективность электроемкостного способа контроля. В статье рассмотрен новый метод определения паразитных емкостей на торцах электродов электроемкостных датчиков. Он позволяет значительно упростить процедуру определения краевого эффекта и вычислять длины эквивалентных извилин для датчиков различных конструкций, что улучшает соответствия теоретических и экспериментальных значений измеряемых параметров, повышает точность контроля.

Электроемкостные методы измерения характеризуются высокой чувствительностью, точностью, быстродействием, малым уровнем потребляемой мощности, низкой себестоимостью. Сравнительно простая технология изготовления электроемкостных преобразователей, воспроизводимость и стабильность характеристик в условиях различных дестабилизирующих факторов, небольшой вес и универсальность позволили использовать электроемкостные методы в различных областях размеромерии, при контроле влажности и состава полуфабрикатов, осуществлять автоматизацию самых разнообразных процессов в промышленности. Благодаря этим качествам такие емкостные средства измерения стали перспективными и конкурентно способными по сравнению со средствами измерения и контроля других типов.

Разнообразие конструктивных и схемотехнических решений, применяемых в электроемкостных средствах контроля, вызвано многообразием объектов контроля, функционально техническим назначением средств измерения и требованиями, предъявляемыми к метрологическим, эксплуатационно-техническим характеристикам. Непрерывное повышение этих требований: точности, разрешающей способности, воспроизводимости, стабильности, обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования конструкций емкостных преобразователей, схем их подключения и технологий изготовления с учетом успехов в области микроэлектроники, компьютерных технологий.

Развитие электроемкостного способа неразрушающего контроля диэлектрических характеристик, геометрических размеров изделий из конструкционных полимерных материалов, металлических изделий, диагностики деформационных и прочностных свойств материалов и изделий неразрывно связано с теоретическими вопросами расчета электрических полей для широкого класса электроемкостных преобразователей.

Практическое выполнение датчиков показывает, что, несмотря на ряд математических моделей, существуют несоответствия между теоретическими и измеренными значениями импедансов. Несоответствия между теоретическими и измеренными значениями затрудняют интерпретацию полученных результатов, снижают эффективность электроемкостного способа контроля. Относительно малые несоответствия приводят к существенным ошибкам. Самыми важными вкладчиками, приводящими к несоответствиям, являются краевые эффекты на краях и торцах электродов, толщина электродов. Явно эти несоответствия начинают проявляться для миниатюрных датчиков [1], когда длина электродов сравнима с шириной датчика, а также в датчиках уровня жидких сред [2], когда краевые эффекты оказывают влияние на начало отсчета уровня. Для устранения этих несоответствий требуется оценка вклада краевого эффекта в емкость.

Рассмотрим методики определения вклада краевого эффекта в емкость на примере конструкций многосекционного накладного измерительного конденсатора (НИК). Накладной измерительный конденсатор представляет собой чередование потенциальных и низкопотенциальных электродов, расположенных на общей подложке толщиной b , ширина секции накладного измерительного конденсатора r , длина ленточных электродов L . В основании подложки находится плоский заземленный экран. Его потенциал практически совпадает с потенциалом низкопотенциальных электродов.

Плоскопараллельные электрические поля НИК неоднородны. Вдоль оси ОХ происходит вариация поля за счет вариации электрического потенциала, а вдоль оси ОУ поле уменьшается по экспоненте [3]. Кроме пространственных неоднородностей им присущи неоднородности на границах электродов НИК

(краевые эффекты). Эти неоднородности связаны с конечным числом секций НИК (рис. 1) и конечной длиной электродов. Неоднородности поля на границах крайних секций могут быть уменьшены, за счет добавления дополнительных электродов охраны с обеих сторон каждой секции [1].

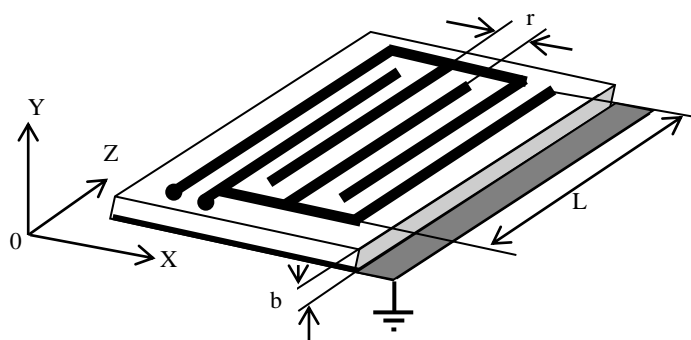


Рис. 1. Многосекционный накладной измерительный конденсатор

Краевой эффект на торцах электродов (рис. 2) связан с конечной длиной электродов и конфигурацией торца. Оценить вклад, вносимый в емкость торцами электродов, можно либо расчетным путем с учетом геометрии извилин электродов [4], либо эмпирическим путем. Существенными недостатками расчетного способа являются, во-первых, зависимость точности определения емкости, вносимой торцами электродов в общую емкость, от точности расчетов (точная геометрия областей концов электродов обычно отличается от идеализированной модели); во-вторых, невозможность точного расчета емкости для всех конфигураций торца электродов.

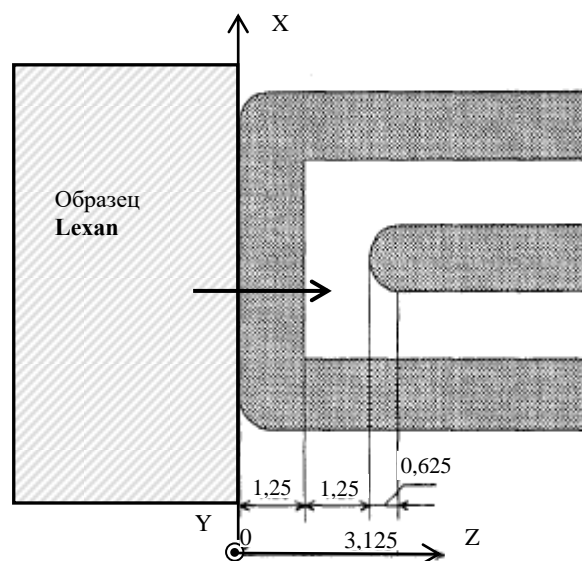


Рис. 2. Торце́д одного из электродов

Известна методика, с помощью которой проводится определение емкости, вносимой торцами электродов в общую емкость. Геометрия торца для одного из электродов показана на рисунке 2. Плоский образец диэлектрика, толщина которого превышает глубину зоны контроля НИК, располагают так, чтобы плоскость торца совпала с плоскостью электродов YOX (как определено в соответствии с рисунком 2). Образец перемещают в направлении оси OZ с дискретным шагом так, чтобы он постепенно покрывал электроды. Естественно, емкость преобразователя начинает изменяться с шагом образца вдоль оси OX. Рост емкости изменяется и становится линейным, когда образец достигает области, где поле датчика является плоскопараллельным. В этот момент положение плоскости торца образца превышает координату $x = 3,125$ мм. Длину электродов, эквивалентную меандру, на торце можно найти, определив изменения в емкости, произошедшие на торце при перемещении образца от 0 мм до 3,125 мм и связывая это изменение с линейным участком, когда образец проходит координату $x = 3,125$ мм. Длина электродов, эквивалентная меандру на торце, приблизительно равна $2r/0,8$ см.

У рассмотренной методики несколько недостатков: во-первых, необходимо контролировать силу прижатия образца к поверхности электродов; во-вторых, плоская граница образца всегда должна быть перпендикулярна ленточным электродам; в-третьих, она занимает много времени и трудоемка. Кроме того, ее тяжело применить к датчикам цилиндрической формы. Осуществлять перемещение твердого диэлектрика внутри цилиндрического датчика с соблюдением всех перечисленных условий сложно. В этом случае датчик цилиндрической формы необходимо располагать, так чтобы его ось принимала строго вертикальное положение, и заполнять датчик жидким диэлектриком (рис. 3). Толщина слоя жидкости должна быть больше ширины зоны контроля. Датчик не должен реагировать на основание сосуда. Определение вклада, вносимого в емкость торцами электродов, аналогично вышерассмотренному случаю. Отрицательным моментом в этой методике является и то, что на результат измерения влияет мениск, образованный за счет смачивания электродов жидкостью.

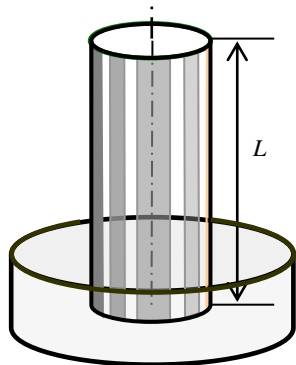


Рис. 3. Преобразователь цилиндрической формы

В данной работе предлагается совершенно иная методика учета оценки вклада краевых эффектов на торцах электродов в рабочую емкость. Она применима для датчиков, создающих плоскопараллельные поля любой конструкции и не требует продолжительных измерений. На торцах электродов поле не является плоскопараллельным, его характер определяется геометрией и конфигурацией электродов. По этой причине у двух идентичных датчиков с различной длиной электродов, но с одинаковой конфигурацией электродов на торцах, характер поля будет одинаковым. Для того чтобы учесть емкости на торцах электродов, достаточно выполнить две идентичные копии преобразователя с различной длиной электродов L_1 и L_2 . Разность емкостей датчиков, измеренных для различных длин L_1 и L_2 , 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. Электроды находились в воздухе. Оценка вклада краевых эффектов на торцах электродов в рабочую емкость проводилась для датчиков, создающих плоскопараллельные поля различной конфигурации НИК, НИК с плоским экраном (ЭНИК), датчиков цилиндрической формы. Электроды вытравливали на двустороннем фольгированном стеклотекстолите марки СТФ толщиной 1 мм. Толщина медного покрытия составляла 20 мкм. Рисунок электродов выполнялся с помощью программы Control Panel – EAGLE 5.0.0 Professional. Ширина электродов составляла 6 мм число секций $n = 7$. Две копии идентичных датчиков имели длину электродов $L_1 = 249$ мм и $L_2 = 95$ мм. Для датчика с длиной электродов $L_1 = 249$ мм, измеренная емкость $C_1 = 4,43$ пФ, для датчика с длиной электродов $L_2 = 95$ мм измеренная емкость $C_2 = 1,73$ пФ. Таким образом, емкость, соответствующая длине $\Delta L = L_1 - L_2 = 154$ мм составила $\Delta C = 2,70$ пФ, емкость C_i , вносимая торцами электродов, составила $C_i = C_1 - \Delta C \cdot L_1 / \Delta L = 0,06$ пФ. Длина, эквивалентная меандру на торце электродов, равна $l = C_i \cdot n \cdot \Delta L / \Delta C = 24$ мм. Относительное значение емкости, вносимой торцами электродов, для первого датчика составляет $C_i / C_1 = 1,35$ %, второго – $C_i / C_2 = 3,5$ %.

Емкостные датчики функционируют в различных дестабилизирующих условиях, вызванных внешними электромагнитными воздействиями. Они подвержены кумулятивному эффекту со стороны ближайших предметов, электрически связанных с землей, что в конечном счете приводит к неоднозначности результатов измерений и нарушению нормального функционирования датчика. Для устранения этого недостатка используют конструкцию датчика для измерения анизотропии диэлектрических свойств тонких диэлектрических материалов [3]. Она представляет собой многосекционный экранированный накладной измерительный конденсатор (ЭНИК). Основу его составляет накладной измерительный конденсатор, поверх которого расположен контролируемый диэлектрический слой и дополнительный плоский заземленный экран, который является подвижным.

Такая конструкция была создана за счет прижатия к НИК одностороннего фольгированного диэлектрика, когда слой металла заземлен. К датчикам прижимался фольгированный стеклотекстолит толщиной $h = 1,58$ мм. Толщина воздушного зазора составила $h_1 \approx 20$ мкм. Измеренная емкость для датчика с L_1 составила $C_1 = 0,883$ пФ, для датчика с $L_2 - C_2 = 0,340$ пФ. Емкость, соответствующая длине $\Delta L = L_1 - L_2 = 154$ мм составила $\Delta C = 0,543$ пФ, емкость C_i , вносимая торцами электродов, составила $C_i = C_1 - \Delta C \cdot L_1 / \Delta L = 0,005$ пФ. Длина, эквивалентная меандру на торце электродов, равна 14 мм. Относительное значение емкости, вносимой торцами электродов, для первого датчика составляет $C_i / C_1 = 0,6$ %, второго $C_i / C_2 = 1,5$ %.

Оценка вклада краевых эффектов на торцах электродов проводилась также и для датчиков цилиндрической формы. Они выполнялись путем свертывания в цилиндр тонкого фольгированного стеклотекстолита СТФ толщиной 0,3 мм. Толщина медных электродов составляла 0,02 мм. Число секций равнялось 6. Радиус цилиндра $R_0 = 13,18$ мм. Угловой размер электродов $f_0 = 21^\circ$, $f_1 = 39^\circ$. Две копии идентичных цилиндрических датчиков имели длину электродов $L_1 = 230$ мм и $L_2 = 170$ мм. Электроды находились в воздухе. Для датчика с длиной электродов $L_1 = 230$ мм, измеренная емкость равнялась $C_1 = 4,93$ пФ, для датчика с длиной электродов $L_2 = 170$ мм измеренная емкость равнялась $C_2 = 3,85$ пФ. Таким образом, емкость, соответствующая длине $\Delta L = L_1 - L_2 = 60$ мм, составила $\Delta C = 1,08$ пФ, емкость C_t , вносимая торцами электродов, составила $C_t = C_1 - \Delta C \cdot L_1 / \Delta L = 0,79$ пФ. Относительное значение емкости, вносимой торцами электродов, для первого датчика цилиндрической формы составляет $C_t / C_1 = 16\%$, второго $C_t / C_2 = 20,5\%$. Столь высокий вклад краевого эффекта связан с конфигурацией переемычек соединяющих электроды. В отличие от накладных измерительных конденсаторов, датчики цилиндрической формы не имеют крайних секций. Им присущ лишь краевой эффект на торцах электродов. Его влияние в случае контроля уровня жидких электропроводящих сред можно устранить за счет введения дополнительного электрода охраны [5].

Заключение. Для оценки вклада краевых эффектов на торцах электродов предложено использовать два идентичных датчика с различной длиной электродов L_1 и L_2 . Это позволяет значительно упростить процедуру определения краевого эффекта и вычислять длины эквивалентных извилин для торцов датчика. Предложенная методика оценки вклада краевых эффектов на торцах электродов значительно улучшает соответствие теоретических и экспериментальных значений измеряемых параметров в датчиках и позволяет рекомендовать разработанную методику для практического использования при проектировании и оптимизации емкостных датчиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГКПНИ «Техническая диагностика-36» (№ 20062708).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mamishev, A.V. Optimization of Multi-Wavelength Interdigital Dielectrometry Instrumentation and Algorithms / A.V. Mamishev, B.C. Lesieutre, M. Zahn // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 1998. – Vol. 5, № 3. – P. 408 – 420.
2. Електроємкостний датчик рівня електропровідної рідини / А.А. Джежора [и др.] // Датчики и системы. – 2008. – № 12. – С. 63 – 69.
3. Джежора, А.А. Електроємкостні преобразователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск: Беларус. наука, 2008. – 305 с.
4. Kirschning, M. Accurate, Wide Range Design Equations for the Frequency Dependent Characteristics of Parallel Coupled Microstrip Lines / M. Kirschning and R.H. Jansen // IEEE Transactions on Microwave Theory Tech. – 1981. – Vol. MTT-32. – P. 83 – 30.
5. Датчик измерения уровня электропроводящей жидкой среды: пат. 13036 РБ, МКИ G01 F 23/22 / А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В.К. Савчук, А.В. Кузьминич. – № а 20080333; заявлено 21.03.2008; опубл. 30.10.2009 // Афіційны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009.

Поступила 28.06.2010

RESEARCH OF REGIONAL EFFECTS AT END FACES ELECTROCAPACITOR SENSORS

A. JEZHORA, V. RUBANIK

Electrocapacitor sensors are widely used in non-destructive control of physicomechanical properties of materials, in definition of the geometrical sizes of objects. Practice of performance of sensors shows, that, despite a number of mathematical models, there are discrepancies between the settlement and measured values of impedances. Discrepancies between the theoretical and measured values of impedances, are caused first of all by end effects at edges of electrodes. They complicate interpretation of the received results, end effects of an electrocapacitor way of the control. In article the new method of definition of parasitic capacities at end faces of electrodes of electrocapacitor sensors is considered. He allows to simplify considerably procedure of definition of end effect and to calculate lengths of equivalent meander length of the end area for sensors of various designs that improves conformity of theoretical and experimental values of measured parameters raises accuracy of the control.