

## ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАКЛАДНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ПРИСУТСТВИИ ЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЛОСКОСТИ

*Джежора А.А.<sup>1</sup>, Кузьмич А.И.<sup>2</sup>, Радевич Е.И.<sup>2</sup>, Рубаник В.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Республика Беларусь

*Рассмотрены принципы проектирования многосекционных экранированных накладных измерительных конденсаторов, используемых для неразрушающего контроля ортотропных материалов. Дан анализ характеристик: глубины зоны контроля, рабочей емкости, чувствительности к анизотропии диэлектрических свойств. Описаны качественные принципы проектирования, даны рекомендации для оптимизации конструкций. (E-mail : Jezhora@mail.ru)*

**Ключевые слова:** многосекционные накладные экранированные измерительные конденсаторы, численное моделирование, проектирование датчиков.

### Введение

Многосекционные накладные измерительные конденсаторы широко используются в неразрушающем контроле физических, физико-механических свойств материалов, таких как влагосодержание, пористость, вязкость, температура, твердость, степень вулканизации, контроле геометрических размеров изделий, диагностике состояния объектов [1–3]. Спектроскопия импеданса, используя электроемкостные датчики, позволяет обнаружить присутствие примесей и их концентрацию в жидкой среде.

Процесс проектирования многосекционных накладных измерительных конденсаторов (МНИК) основан на хорошем понимании физики процессов, происходящих как в области контроля, так и в области подложек датчиков, и подробно рассмотрен в работах [4, 5]. Число работ, посвященных вопросам проектирования МНИК с дополнительным заземленным экраном, крайне мало [6, 7].

Цель данной работы – рассмотреть процесс проектирования МНИК с дополнительным заземленным экраном с учетом факторов, оказывающих влияние на глубину и ширину зоны контроля, силу сигнала, чувствительность к анизотропии диэлектрических свойств ортотропных материалов.

Процесс проектирования полагается на модели, построенные с помощью численных,

полуаналитических либо аналитических методов расчета. Аналитические модели, основанные на методе конформных отображений либо непосредственного расчета напряженности электрического поля, применяются для оценки влияния геометрических размеров датчика на его емкость, проверки сходимости численных расчетов с точными аналитическими расчетами, выполненными для однородных сред. Полуаналитические модели электроемкостных датчиков основаны на непосредственном решении уравнения Лапласа и применении метода коллокации [5]. Толщина электродов при решении таких задач не учитывается и служит источником несоответствия между теоретическими и измеренными значениями импедансов. Несогласия между теоретическими и измеренными значениями затрудняли интерпретацию полученных результатов, снижали эффективность электроемкостного способа контроля. Для устранения указанных несоответствий был разработан численный метод расчета электроемкостных преобразователей на основе метода интегральных уравнений Фредгольма первого рода [7, 8]. Представление электродов в виде зеркально-симметричных поверхностей, разнесенных в пространстве на расстояние, равное толщине реальных электродов [7], позволило без потери точности упростить процедуру численного расчета двумерной задачи по сравнению с применением стандартных конечно-элементных схем [5], сократить вычисли-

тельные затраты (по памяти – в 1,5–2,5 раза, по времени счета – в 2–3 раза). Результаты моделирования МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном [7] (рисунок 1) позволили выявить основные качественные взаимосвязи между их характеристиками и параметрами

расчета. Они включают в себя влияние на глубину зоны контроля, силу сигнала, чувствительность к анизотропии диэлектрических свойств ортотропных материалов геометрических размеров контролируемого образца, электродов, подложки.

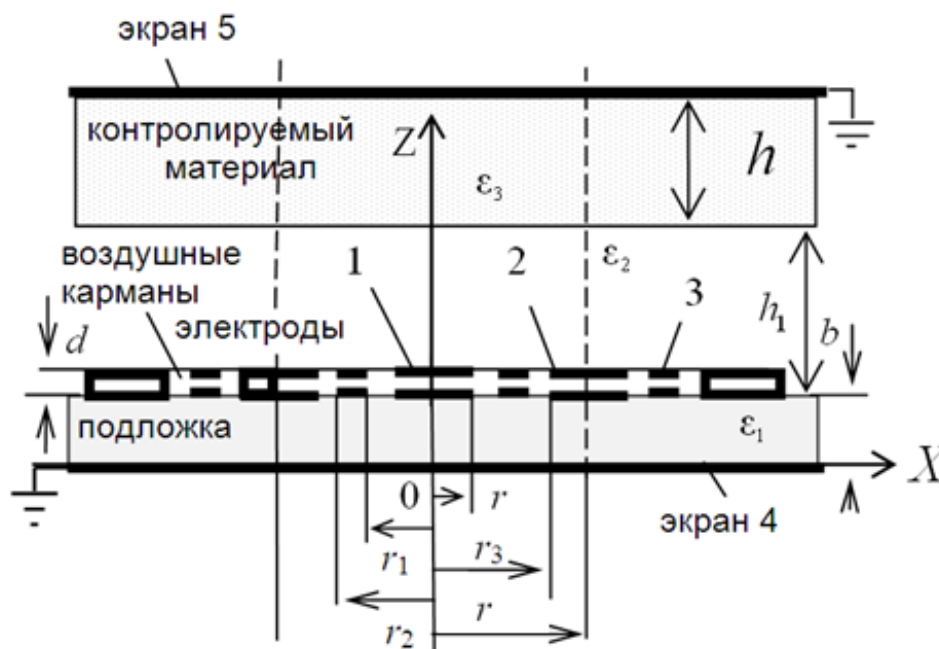


Рисунок 1 – Сечение многосекционного накладного измерительного конденсатора с дополнительным заземленным экраном

### Глубина и ширина зоны контроля

Емкостные датчики функционируют в различных дестабилизирующих условиях, вызванных внешними электромагнитными воздействиями, и подвержены кумулятивному эффекту со стороны ближайших предметов, электрически связанных с землей. Введение в конструкцию МНИК дополнительного плоского экрана 5 поверх контролируемого диэлектрического материала (рисунок 1) приводит к ряду особенностей работы такой конструкции. Во-первых, происходит устранение влияния внешних электромагнитных полей, не проявляется кумулятивный эффект. Во-вторых, экран 5 отсекает часть потока силовых линий напряженности электрического поля и увеличивает горизонтальную составляющую напряженности, что крайне важно для контроля анизотропии диэлектрических свойств ортотропных материалов. В-третьих, происходит изменение не толь-

ко глубины, но и ширины зоны контроля МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном.

Расчетные картины полей трех МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном в воздухе ( $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 1$ ) представлены на рисунке 2. Датчики имеют одни и те же параметры: толщина электродов  $d = 7$  мкм, размер секции  $r = 1$  мм, ширина потенциальных электродов  $r_0 = r - r_3 = 0,25$  мм, материал подложек – тефлон ( $\epsilon_1 = 2,1$ ). Различия касаются наличия охранных электродов шириной  $r_2 - r_1 = 0,1$  мм и толщины подложек  $b = 0,508$  мм и  $0,254$  мм.

Для датчиков МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном глубина зоны контроля определяется границей раздела двух потоков напряженности электрического поля: потока силовых линий, замыкающегося на поверхность экрана 5, и потока силовых линий, замыкающегося на поверхность электрода 2

(рисунок 2). На краях секций потоки разделяются, образуя особые точки (выделены кольцами), где наблюдаются локальные экстремумы функции потенциала электрического поля  $V(r, z^*)$ . В этих точках вертикальная составляющая напряженности  $E_z(r, z^*)$  обращается в нуль. Координата  $z^*$  точки определяет глубину зоны

контроля. Ширина зоны контроля в отсутствии экрана 5 совпадает с размером секции  $r$ . При расположении экрана 5 над плоскостью компланарных электродов потоки силовых линий напряженности электрического поля разделяются, и ширина зоны контроля становится меньше размера секции  $r$  (рисунок 2а).

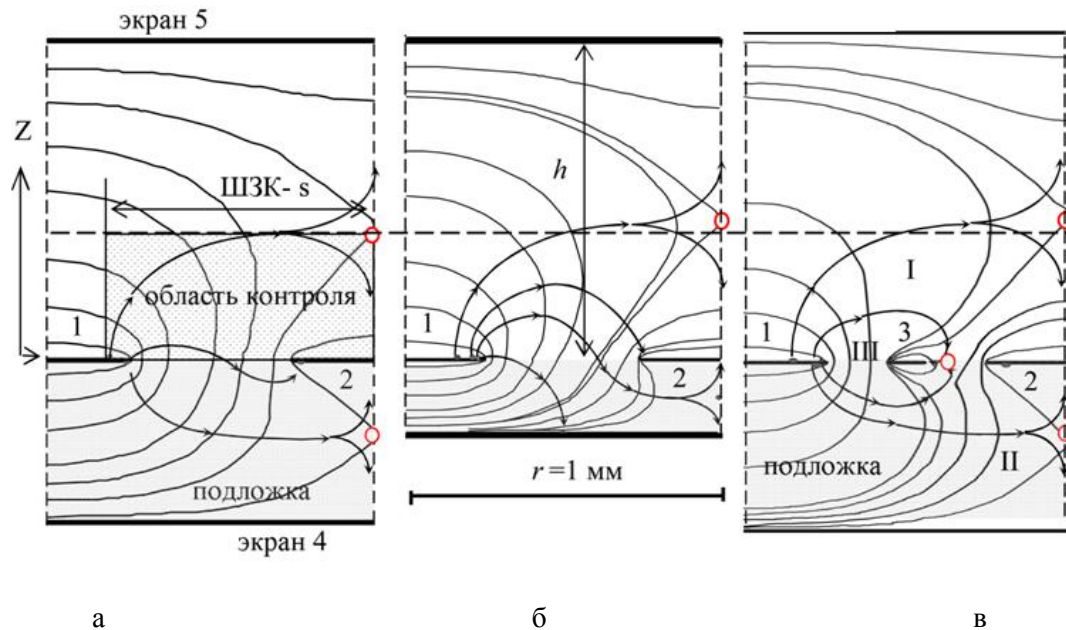


Рисунок 2 – Расчетные картины электрических полей многосекционных накладных измерительных конденсаторов с дополнительным заземленным экраном: а, б – без охранного электрода; в – с охранным электродом 3

Для конструкции МНИК (заземленный экран 5 удален) глубина зоны контроля составляет  $z^* \approx 0,33$  мм. При размещении экрана 5 на расстоянии  $h = 1$  мм от плоскости компланарных электродов глубина зоны контроля  $z^*$  возрастает и принимает значение  $z^* \approx 0,41$  мм, ширина зоны контроля сужается до значения  $s = 0,81$  мм. При уменьшении толщины подложки ( $b = 0,254$  мм; рисунок 2б) экран 4 в основании подложки оттягивает часть силовых линий напряженности электрического поля на себя, выпучивает поле вверх и увеличивает глубину зоны контроля.  $z^* \approx 0,44$  мм и ширину зоны контроля  $s = 0,83$  мм. Однако, значение рабочей емкости между потенциальными электродами 1, 2 падает и сила сигнала уменьшается. Аналогичный эффект возникает при размещении охранного электрода (рисунок 2в).

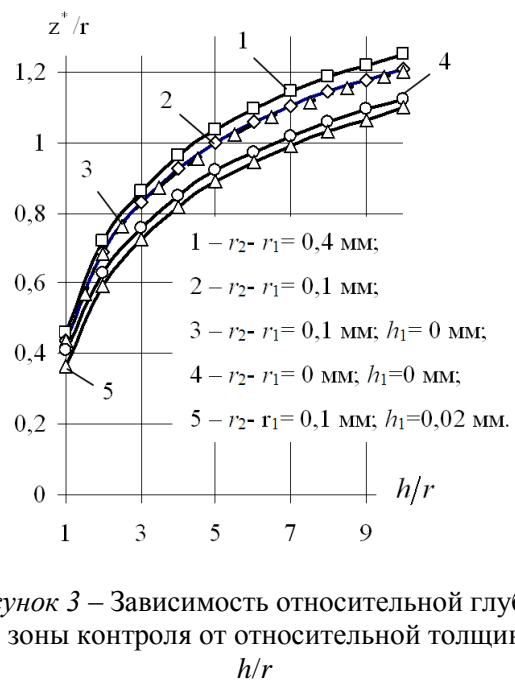


Рисунок 3 – Зависимость относительной глубины зоны контроля от относительной толщины  $h/r$

Глубина зоны контроля МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном зависит также от относительной толщины контролируемого диэлектрика  $h/r$ . В качестве объекта контроля был выбран диэлектрик с  $\epsilon_3 = 5,7$ , проводимость которого равна нулю. Толщина диэлектрического слоя  $h$  изменялась в пределах 0–1 мм. Так как поверхность диэлектрика неидеальна, то толщина воздушного зазора  $h_1$  варьировалась и составляла 0, 20 мкм, 40 мкм. Семейства расчетных кривых зависимости относительной глубины зоны контроля от относительной толщины контролируемого диэлектрика для двух конструкций МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном с охранными электродами и без представлены на рисунке 3. Анализ кривых позволяет сделать следующие выводы:

- толщина электродов не сказывается на глубине зоны контроля. Для двух диэлектриков «жидкого» ( $r_2 - r_1 = 0,1$  мм) и «твердого» ( $r_2 - r_1 = 0,1$  мм;  $h_1 = 0$ ) кривые  $z^*/r(h/r)$  совпадают. У «твердого» диэлектрика за счет толщины электродов между подложкой и образцом образуются воздушные карманы, у «жидкого» диэлектрика они отсутствуют;

- независимо от наличия у МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном

охранных электродов глубина зоны контроля ограничена и не превосходит половины толщины образца  $h$ ;

- чем больше ширина охранного электрода, тем больше глубина зоны контроля.

Однако, вместе с этим происходит уменьшение силы сигнала, т. е. падение межэлектродной емкости  $C_{12}$ . Подтверждением этому служат графики зависимости межэлектродной емкости  $C_{12}$  от расстояния  $h_1+h$  между заземленным экраном и плоскостью компланарных электродов МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном (рисунок 4). Это объясняется тем, что емкость формируется потоком напряженности электрического поля между электродами 1 и 2, а он как раз и уменьшается за счет «вырезания» его максимальной плотности охранными электродами 3.

На рисунке 4 (кривые 1, 2, 3, 4) видно, что воздушный зазор  $h_1$  играет важную роль в образовании аномальных областей: с ростом диэлектрической проницаемости  $\epsilon_3$  (кривые 1, 2, 3) межэлектродная емкость уменьшается по сравнению с емкостью в воздухе кривая 4 ( $\epsilon_3 = 1$ ) [6]. В этой области контролируемый диэлектрик экранируется плоским экраном 5, который оттягивает потоки электрического поля, и межэлектродная емкость мала.

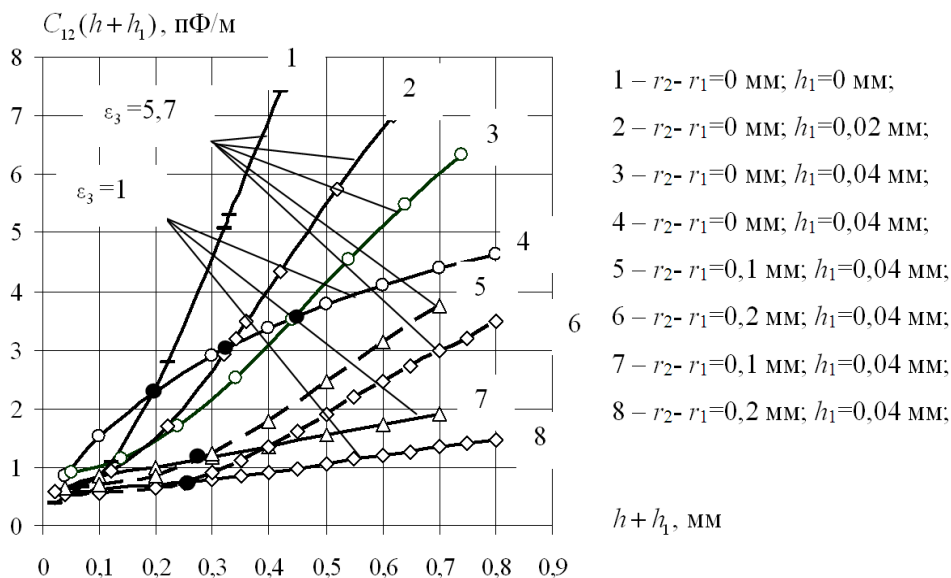


Рисунок 4 – Зависимость межэлектродной емкости  $C_{12}$  на единицу длины от расстояния  $h+h_1$  между заземленным экраном 5 и плоскостью электродов

Диапазон аномальной области зависит от воздушного зазора  $h_1$ . С ростом зазора  $h_1$  верхняя граница аномальной области смещается вправо (рисунок 4). Верхняя граница аномальной области размыта и представляет собой очень узкий диапазон критических толщин слоя  $h$ . На рисунке 4 она представлена жирными точками. Для кривой, соответствующей зазору  $h_1 = 0,02$  мм, диапазон критических толщин расположен вблизи критической толщины  $h = 0,32$  мм, для кривой, соответствующей  $h_1 = 0,04$  мм, – вблизи толщины  $h = 0,44$  мм.

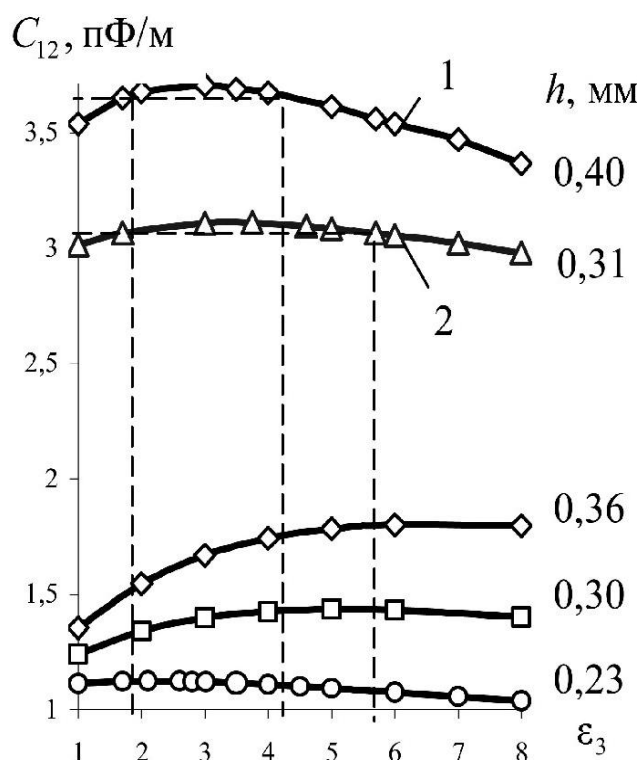


Рисунок 5 – Межэлектродная емкость на единицу длины электродов  $C_{12}$  как функция  $\epsilon_3$

Конструкциям МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном с охранными электродами и без них свойственен эффект двойственности результата в критическом диапазоне. Он заключается в том, что диэлектрикам с различной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3 = 1,7$  и  $\epsilon_3 = 4,15$ , но одинаковой толщиной диэлектрического слоя, например,  $h = 0,40$  мм, в случае воздушного зазора  $h_1 = 0,04$  мм, присуще одно значение емкости  $C_{12} = 3,65$  пФ/м (рисунок 5). Для воздушного зазора  $h_1 = 0,02$  мм (кривая 2), ди-

электрикам с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3 = 1,7$  и  $\epsilon_3 = 5,7$ , имеющим толщину  $h = 0,31$  мм, соответствует значение емкости  $C_{12} = 3,06$  пФ/м.

Для датчиков с охранными электродами шириной  $r_2 - r_1 = 0,1$  мм, при воздушном зазоре  $h_1 = 0,04$  мм диапазон критических толщин  $h$  составляет 0,23–0,36 мм (рисунок 5). Диэлектрическим образцам с одинаковой толщиной  $h = 0,30$  мм, имеющим значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_3 = 4,3$  и  $\epsilon_3 = 6,0$ , соответствует одно и то же значение емкости  $C_{12} = 1,43$  пФ/м.

### Чувствительность датчиков к анизотропии диэлектрической проницаемости

В ряде практических задач важно знать анизотропию структуры ортотропного материала [1]. Выбор геометрических параметров МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном осуществим, исходя из максимальной чувствительности к анизотропии материала с  $\epsilon_x = 1,9$  и  $\epsilon_z = \epsilon_y = 1,2$ . Расчетные картины относительной разности емкостей дифференциального преобразователя  $C_1 / C_0$  и  $C_2 / C_0$  от относительного расстояния до экрана  $h/D_r$  ( $D_r = r_1 - r_0$ ) представлены на рисунке 6 ( $C_0$  – емкость МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном в воздухе). Рассмотрим ряд случаев. Первый – в плечи дифференциального датчика помещены изотропные материалы, значения диэлектрических проницаемостей которых  $\epsilon_1 = 1,9$  и  $\epsilon_2 = 1,2$  (кривая 1). Второй случай соответствует датчикам с толщиной подложки  $b = 1$  мм (кривая 2), третий – датчикам с толщиной подложки  $b = 2$  мм (кривая 3) и четвертый – датчикам с толщиной подложки 4 мм (кривая 4). Для всех трех последних случаев контролируемый материал имел следующие электрические характеристики:  $\epsilon_x = 1,9$  и  $\epsilon_z = \epsilon_y = 1,2$ , электрическая проводимость отсутствует.

Из рисунка 6 следует:

– в случаях заполнения дифференциальных датчиков анизотропным материалом наблюдается максимум чувствительности относительного изменения емкости с изменением направления поля (кривые 3, 4, 5);

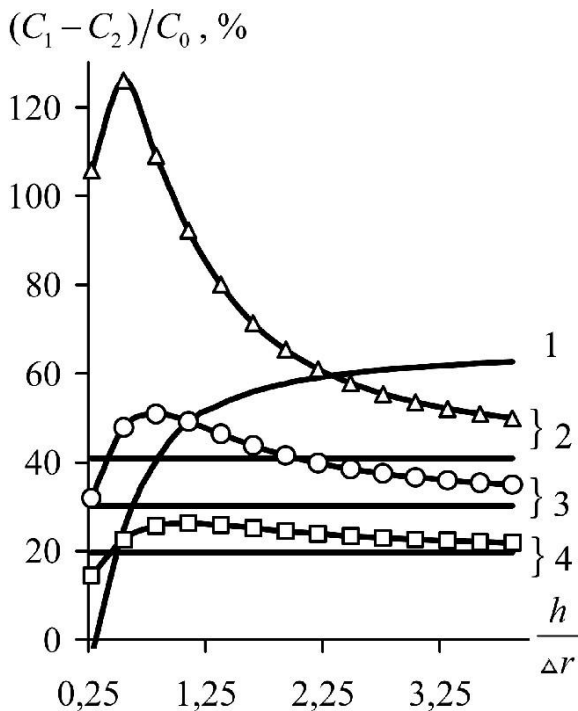


Рисунок 6 – Зависимость относительной разности емкостей  $DC/C_0$  дифференциального датчика от относительного межэлектродного расстояния  $h/\Delta r$

– максимумы чувствительности датчиков к анизотропии диэлектрической проницаемости смещены друг относительно друга: чем толще подложка, тем больше относительное межэлектродное расстояние  $h/\Delta r$ , соответствующее максимуму чувствительности датчиков к анизотропии диэлектрической проницаемости;

– чувствительность датчика МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном к анизотропии диэлектрической проницаемости возрастает с уменьшением толщины подложки;

– наличие максимумов чувствительности датчика МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном к анизотропии диэлектрической проницаемости вызвано анизотропией материала, размещение изотропных материалов  $\epsilon_1 = 1,9$  и  $\epsilon_2 = 1,2$  в плечах дифференциального датчика не приводит к возникновению максимума по мере уменьшения  $h$  (кривая 1).

Наличие максимума у кривых зависимости относительной разности емкостей  $(C_1 - C_2)/C_0$  от  $h/\Delta r$  говорит о том, что с уменьшением рас-

стояния  $h$  от экрана 5 до плоскости электродов МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном, чувствительность к анизотропии возрастает до определенного предела. Это вызвано увеличением доли горизонтальной составляющей напряженности поля. Затем начинает проявлять себя экран 5 (рисунок 1): он оттягивает часть потока напряженности поля на себя, уменьшая долю горизонтальной составляющей, и чувствительность падает. При увеличении относительного расстояния  $h/\Delta r \rightarrow \infty$  относительная разность емкостей МНИК с дополнительным плоским заземленным экраном стремится к значению относительной разности емкостей многосекционных накладных измерительных конденсаторов (на рисунке 6 выделена прямыми). Наиболее оптимальное отношение  $h/\Delta r$  лежит в интервале от 1 до 2.

#### Заключение

Выявлены закономерности, позволяющие обоснованно подходить к проектированию конструкций многосекционных экранированных накладных измерительных конденсаторов, осуществлять выбор параметров датчиков, определять их метрологические характеристики, решать вопрос технической осуществимости поставленной задачи. В отличие от традиционно используемых датчиков – накладных измерительных конденсаторов, конструкциям экранированных МНИК присущ ряд особенностей:

– методы неразрушающего контроля анизотропии диэлектрических свойств ортотропных материалов, основанные на применении датчиков в виде многосекционных экранированных накладных измерительных конденсаторов, позволяют повысить точность измерения анизотропии диэлектрических свойств по сравнению с методами, основанными на конструкции накладных измерительных конденсаторов, в 1,5–3 раза;

– датчикам присущ эффект двойственности результата измерений, который при наличии воздушных зазоров не всегда позволяет однозначно трактовать результаты измерений;

– глубина зоны контроля экранированных датчиков ограничена и не превосходит половины толщины образца;

– ширина зоны контроля определяется расстоянием от плоскости электродов до экрана и зависит от толщины подложки датчика;

– уменьшение толщины подложки датчиков приводит к незначительному возрастанию глубины и ширины зоны контроля, сила сигнала (рабочая емкость датчика) при этом падает.

#### Список использованных источников

1. *Джежора, А.А.* Диэлькометрический метод определения влажности волокон / А.А. Джежора // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 9. – Т. 76. – С. 44–48.
2. *Craig, M.* Dielectric spectroscopy as a novel analytical technique within the pharmaceutical sciences / M. Craig // STP-Pharma-Pratiques. – Vol. 5. – №. 6. – 1995. – P. 421–442.
3. *Ogale, A.A.* Fill front detection using dielectric sensors in resin transfer molding processes / A.A. Ogale [et al.] // Proc. Int. Conf. Composites/Nano Engineering. – 2003. – P. 529–530.
4. *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.
5. *Xiaobei, B. Li* Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors / B. Li Xiaobei [et al.] // IEEE Sensors Journal. – Vol. 6. – № 2, 2006. – P. 434–440.
6. *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. – P. 993–1004.
7. *Джежора, А.А.* Моделирование накладных измерительных конденсаторов в присутствии заземленной плоскости / А.А. Джежора // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 2 (49). – С. 38–42.
8. *Джежора, А.А.* Модель накладного измерительного конденсатора / А.А. Джежора // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-тех. наук. – 2010. – № 3. – С. 99–103.

---

Jezhora A.A., Kuzmitch A.I., Radevich E.I., Rubanik V.V.

#### Principles of designing of fringing electric field sensors in the presence of a top ground plane bounding

Designing principles of fringing electric field (FEF) sensors in the presence of a top ground plane bounding are considered. The analysis of characteristics, such as of penetration depth, working capacity, sensitivity to anisotropy of dielectric properties is given. Qualitative principles of designing are described, recommendations for optimizations of designs are given. (E-mail : Jezhora@mail.ru)

**Key Words:** FEF sensor, numerical simulation, sensor design.

*Поступила в редакцию 11.10.2011.*