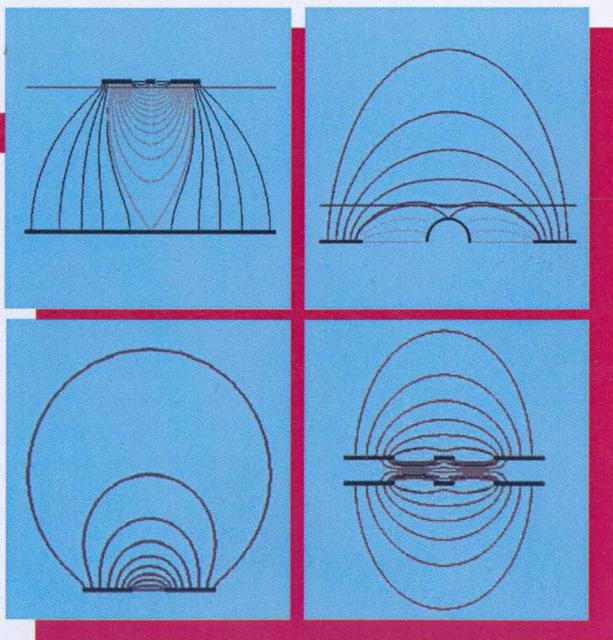




А. А. Джежора

# ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Институт технической акустики

А. А. Джежора

# ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

*Под редакцией  
доктора технических наук  
В. В. Рубаника*



Минск  
«Белорусская наука»  
2008

УДК 621.317.7.087.92+531.9

**Джежора, А. А.** Электроемкостные преобразователи и методы их расчета / А. А. Джежора; под. ред. В. В. Рубаника. – Минск : Белорус. наука, 2007. 351 с. – ISBN 978-985-08-0888-2.

Монография посвящена теории и расчету электроемкостных преобразователей, вопросам их использования для неразрушающего контроля диэлектрических характеристик и коррелирующих с ними параметров состава, структуры полимерных материалов, а также измерениям геометрических размеров пластин, оболочек, профилей, уровня жидких и сыпучих сред, давления, перемещений.

Приведены расчеты и описания конструкций электроемкостных преобразователей, методики измерения основных характеристик электроемкостных преобразователей. Рассмотрены методы расчета преобразователей, заполненных как слоистыми изотропными средами, так и средами с ортогональной анизотропией физических свойств. Большое внимание уделено вопросам контроля анизотропии диэлектрических свойств полимерных материалов.

Ил. 226. Табл. 3. Библиогр.: 170 назв.

**Р е ц е н з е н т ы:**

академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор В. В. Клубович,  
доктор физико-математических наук, профессор Ю. В. Трубников

**ISBN 978-985-08-0888-2**

© Джежора А. А., 2008  
© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Белорусская наука», 2008

## ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы в развитии информационно-измерительной техники произошел существенный прорыв, обусловленный в первую очередь гигантским прогрессом микроэлектроники и компьютеризацией. Широкое применение микропроцессоров привело к созданию «интеллектуальных» первичных преобразователей. Невысокая себестоимость позволила существенно расширить сферу их применения, осуществить автоматизацию самых разнообразных процессов в промышленности, медицине, в повседневной жизни. Как следствие, появился огромный интерес к созданию и разработке первичных преобразователей (датчиков контроля). Среди большого многообразия методов и средств неразрушающего контроля следует выделить электроемкостной метод. Это связано со сравнительно простой технологией изготовления электроемкостных преобразователей, их высокой точностью, разрешающей способностью, воспроизводимостью и стабильностью в условиях различных дестабилизирующих факторов.

На начальном этапе проектирования первичных преобразователей необходимо применять высокие технологии с использованием САПР, пакеты тестирования и наладки средств контроля. В связи с этим задача разработки различных пакетов программ для математического моделирования преобразователей информации с различными объектами контроля, их тестирования является актуальной.

Данная книга посвящена разработке теории и расчету электроемкостных преобразователей, вопросам их проектирования, методам контроля диэлектрических характеристик ортотропных материалов. Большое внимание уделено вопросам математического моделирования электроемкостных преобразователей, методам определения основных характеристик преобразователей: ширины и глубины зон контроля, рабочих и паразитных емкостей, функциям

преобразования, характеру распределения полей, методам контроля анизотропии физических свойств ортотропных материалов, путям устранения дестабилизирующих факторов (колебания температуры окружающей среды, влажности, давления, внешние электромагнитные воздействия). Подробно рассмотрены преобразователи различных типов и конструкций, приведены функциональные выражения, описывающие тот или иной тип преобразователей.

Необходимо отметить, что данное издание является первой серьезной обобщающей работой после монографии И. Г. Матиса «Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля».

Книга предназначена для специалистов, работающих в области научного приборостроения и автоматизации процессов управления и контроля, и может быть полезна инженерно-техническим и научным работникам, аспирантам, студентам.

*Доктор технических наук  
В. В. Рубаник*

## **ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

В первой главе приводится подробный обзор работ, посвященных электроемкостным методам неразрушающего контроля линейно-протяженных материалов, определению параметров состава и структуры веществ, контролю содержания связующего материала и наполнителя в армированных пластиках, контролю геометрических размеров изделий, в частности, толщины диэлектрических пластин и труб, диаметра и размеров поперечного сечения металлических изделий. Приводится классификация электроемкостных преобразователей по назначению, по конструктивным особенностям, по способам разделения входных параметров, по характеру их подключения. В этой же главе приведены основные характеристики преобразователей: рабочая и паразитная емкости, глубина и ширина зоны контроля, функции преобразования – зависимости емкости конденсатора от входных параметров, распределение напряженности поля. Одним из наиболее ответственных этапов проектирования электроемкостных средств неразрушающего контроля является выбор размеров первичных преобразователей, поэтому в главе подробно изложены способы определения рабочих и паразитных емкостей преобразователей, методики определения глубины и ширины зон контроля. Рассматриваются основные особенности преобразователей: наличие неоднородности электрического поля в рабочем пространстве преобразователя, соотношение рабочей и паразитной емкостей, зависимость рабочей емкости от влияющих факторов (температура, давление, внешние поля, чистота поверхности и т. д.).

### **1.1. Применение электроемкостных преобразователей**

Разработка электроемкостного метода неразрушающего контроля связана с созданием электроемкостных преобразователей, позволяющих локализовать электрические поля на желаемом участке

контролируемого изделия. Однако решение данной задачи сопровождается рядом явлений, значительно ограничивающих использование всех возможностей электроемкостного способа относительно точности и информативности.

Непосредственно неразрушающему контролю диэлектрических характеристик посвящены работы И. Р. Зурбрика [1–4], Д. Л. Вайделиха [5], В. Д. Коллинза [6], работы А. Ё. Нетушила [7–10] работы, проведенные под руководством И. Е. Матиса [11–17], Ю. А. Скрипника [18–27].

Значительно больше работ посвящено определению параметров состава и структуры материалов. Например, работы М. А. Берлинера [28–30], А. А. Лапшина [31] и ряд других [32–38], в которых рассматривается круг вопросов, связанных с использованием электроемкостного метода для определения влажности (диэлькометрический метод). Во влагомерах, построенных с использованием этого метода, в качестве первичных преобразователей используются измерительные конденсаторы, выполненные в виде прямых либо концентрических компланарных [39], гребенчатых [40], игольчатых [41, 42] электродов, накладываемых на контролируемую поверхность. Разновидности таких преобразователей рассматриваются в [43–45]. Основным недостатком диэлькометрических влагомеров, построенных по однопараметровой измерительной схеме, является зависимость показаний:

- от толщины контролируемого слоя;
- от условий контакта преобразователя с контролируемой поверхностью для твердых материалов;
- от ориентации вектора напряженности электрического поля по отношению к осям анизотропии материала;
- от плотности материала.

Последние два недостатка особенно ощутимо проявляются при контроле сминаемых материалов, таких как ткани, волокна, пряжа.

Для устранения этих недостатков используют многопараметровый способ контроля, нашедший применение в конструкции двухчастотного измерителя влажности [46–48], трехчастотного, предназначенного для одновременного измерения двух параметров (состава и влажности) с устранением влияния плотности контролируемого материала, формовочных смесей [49]. В [50] приведено описание

двухпараметровых измерителей, основанных на амплитудно-фазовом способе разделения сигналов, в [51] – трехпараметрового измерителя, сочетающего частотный и амплитудно-фазовый способы селекции сигналов. В [52, 53] рассматриваются возможности контроля влажности по глубине за счет вариации потенциала на дополнительном электроде.

Контроль влажности представляет собой частный случай более общей задачи контроля состава и структуры вещества. Решение этой задачи основано на зависимости комплексной диэлектрической проницаемости смеси от диэлектрической проницаемости и объемных концентраций отдельных компонентов [54]. Поэтому электроемкостный метод нашел широкое применение для контроля содержания связующего материала и наполнителя в армированных пластиках [55–58], состава полезных ископаемых [59], плотности [60, 61]. Известны примеры использования электроемкостного способа для наблюдения за кинетикой некоторых физических и химических процессов, например, степени полимеризации [62, 63], термической и механической обработки [64, 65]. Широко применяется электроемкостный метод при неразрушающем контроле геометрических размеров диэлектрических и металлических изделий, в частности, толщины пластин и труб [19, 20, 24, 66–76], линейных перемещений [77–80], диаметра и размеров поперечного сечения линейно-протяженных металлических изделий [75, 76, 81], при контроле шероховатостей электропроводящих и неэлектропроводящих поверхностей [82, 83]. Все эти работы основаны на том, что контролируемое изделие частично либо полностью заполняет рабочее пространство измерительного преобразователя и изменение контролируемого размера вызывает перераспределение объемных концентраций компонентов в образовавшейся гетерогенной системе и, как следствие, изменение его емкости. На основании зависимости диэлектрических характеристик от направления вектора напряженности приложенного электрического поля построены измерители для определения ориентации армирующих волокон в композитных материалах и измерители анизотропных свойств материалов [84, 88]. В тех случаях, когда анизотропия служит одним из информационных параметров, ее используют при контроле влажности ортотропных сред [89].

По характеру воздействия контролируемого объекта на выходной сигнал электроемкостных преобразователей (ЭП) их подразделяют на следующие четыре группы:

а) преобразователи, контролирующие физико-химические свойства исследуемой среды и определяющие ее диэлектрическую проницаемость или коэффициент диэлектрических потерь. Выходной информативной характеристикой в данном случае является емкость или тангенс угла потерь преобразователя;

б) преобразователи, контролирующие физико-механические свойства среды и определяющие анизотропию, в том числе диэлектрические характеристики. Выходной информативной характеристикой является диаграмма анизотропии по выбранной диэлектрической характеристике (зависимость диэлектрической характеристики от направления вектора напряженности электрического поля, приложенного к исследуемому материалу);

в) преобразователи, контролирующие геометрические размеры исследуемого изделия или его отдельных компонентов и образующие гетерогенное рабочее пространство преобразователя, изменение которого вызывает перераспределение объема составляющих гетерогенной структуры. Выходной информативной характеристикой является емкость или тангенс угла потерь преобразователя;

г) преобразователи, контролирующие физико-механические свойства исследуемой среды, определяющие ее динамические релаксационные характеристики и влияющие на выходной информативный параметр в виде временной или частотной зависимости диэлектрической характеристики.

Кроме того, ЭП классифицируют по назначению, по конструктивным особенностям, по способам разделения входных параметров, по характеру подключения. По конструктивному признаку в зависимости от взаимного расположения объекта контроля и электродов ЭП все конструкции разделяют на две большие группы: накладные и проходные преобразователи. В накладных преобразователях электроды расположены только с одной стороны к поверхности объекта контроля, чаще всего в одной плоскости или по криволинейной поверхности, повторяющей форму поверхности объекта контроля. Поле накладных преобразователей неоднородно и пронизывает объект контроля только с одной стороны. Объекты контроля

проходных преобразователей расположены между электродами преобразователя. Ими являются линейно-протяженные изделия ленты, полосы волокна, проволока, пряжа. Эти конструктивные особенности в значительной степени определяют функциональные возможности преобразователей, характер источников погрешностей и меры их устранения.

По назначению ЭП можно подразделить на преобразователи для контроля твердых материалов с плоской или криволинейной поверхностью, жидких и сыпучих материалов.

По характеру подключения ЭП подразделяют на двухэлектродные, трехэлектродные или трехзажимные преобразователи.

## 1.2. Основные характеристики электроемкостных преобразователей

Основными характеристиками ЭП являются:

а) рабочая емкость  $C_p$ , т. е. емкость того воздушного участка (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_1$  равна единице), который заполняется контролируемым материалом;

б) паразитная емкость  $C_n$ , т. е. емкость, создаваемая подложкой, соединительным кабелем (диэлектрическая проницаемость не обязательно равна единице);

в) тангенс угла потерь, или добротность незаполненного исследуемым материалом ЭП;

г) глубина зоны контроля (ГЗК) и ее ширина (ШЗК) (размеры контролируемого ЭП участка исследуемого материала);

д) функция преобразования – зависимость емкости (в более общем случае комплексной емкости) конденсатора от входных параметров;

е) частные производные по входным параметрам  $\frac{\partial C}{\partial r}$ ,  $\frac{\partial C}{\partial b}$ ,  $\frac{\partial C}{\partial \epsilon}$ ;

ж) распределение напряженности электрического поля в исследуемом материале.

Параметры, упомянутые в пунктах а, б, в, входят во все расчетные соотношения для определения диэлектрических характеристик. Функция преобразования и частные производные (пункты д, е) используются в задачах оптимизации конструкций электроемкост-

ных преобразователей как для одно-, так и для многопараметрового контроля. Кроме того, в последнем случае эти характеристики необходимы также для решения системы уравнений и исследования селективности контроля. Распределение напряженности поля (пункт ж) дает представление о влиянии различных участков контролируемого объекта на результат контроля, о структуре и используется при осуществлении методики послойного контроля диэлектрических характеристик, изучении анизотропии плоских материалов.

Одним из наиболее ответственных этапов при создании электроемкостных средств неразрушающего контроля является выбор размеров первичных преобразователей. Если при контроле с помощью проходных преобразователей область контроля определена, то при контроле с помощью накладных измерительных конденсаторов (НИК) она ограничена глубиной и шириной зоны контроля. Электроемкостный способ контроля предусматривает введение исследуемого объекта в электрическое поле, создаваемое электрическим преобразователем, и определение искомым характеристикам материала по вызванной этим материалом обратной реакции, отклика на источник электрического поля. В силу этого существуют две методики определения глубины и ширины зон контроля по реакции преобразователя на внесенный объект. В основу первой методики положена регистрация изменения емкости НИК при поднесении изолированного плоского проводника [90]. Это изменение вызвано полем индуцированных в проводнике зарядов. Действительно, согласно методу зеркальных отображений [91], поле индуцированных зарядов характеризуется через коэффициент отражения

$$\lambda = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad (1.1)$$

где  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость среды, в которой расположен электроемкостной преобразователь,  $\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость объекта, внесенного в поле. Максимально возможное значение коэффициент отражения достигает в случае, когда в поле НИК вносится незаземленный проводник, величина диэлектрической проницаемости которого стремится к бесконечности. При таком подходе измеряется только отклик изменения поля преобразо-

вателя на внесенный объект. Глубина зоны контроля определяется в этом случае как расстояние от плоскости электродов до проводящей плоскости, параллельной плоскости электродов, находящихся в воздухе, когда внесенная проводником емкость составляет заданную величину от рабочей емкости конденсатора [90]. Ширина зоны контроля определяется как расстояние от оси электродов до проводящей плоскости, перпендикулярной плоскости электродов, находящихся в воздухе, когда вносимая проводником емкость составляет заданную величину от рабочей емкости конденсатора [90].

Наряду с вышеизложенной методикой существует другая методика определения зон контроля, основанная на регистрации изменения емкостей двух зеркально-симметричных НИК, когда поля, взаимодействуя, оказывают влияние друг на друга [92–96]. В силу того, что сразу регистрируется изменение емкости двух идентичных НИК, чувствительность к изменению емкости по сравнению с методикой, основанной на поднесении изолированного плоского проводника, возрастает в два раза. В этом случае границей поля является половина расстояния между плоскостями электродов двух НИК, находящимися в воздухе, начиная с которого внешние поля не оказывают влияния друг на друга и общая емкость преобразователей остается неизменной [92]. Аналогичным образом определяется ширина зоны контроля как половина расстояния между осями электродов двух соседних НИК, находящимися в воздухе, при котором внешние поля не оказывают влияния друг на друга и общая емкость преобразователей остается неизменной [95].

Такое внимание к ГЗК и ШЗК связано с тем, что при проектировании измерительных устройств с накладными измерительными конденсаторами приходится сталкиваться со следующими противоречиями: с одной стороны, для определения свойств контролируемого материала по всей толщине необходимо, чтобы глубина контроля превышала толщину исследуемого материала; с другой стороны, обеспечение этого требования может стать причиной возникновения дополнительной погрешности, например, при изменении толщины материала, свойств среды, с противоположной стороны контролируемого объекта.

В понятие ШЗК входит минимальная площадь измерения. ШЗК должна быть меньше минимального размера поверхности контро-

лируемого объекта. Нарушение этого условия приводит к так называемому краевому эффекту.

Таким образом, при разработке средств контроля с использованием ЭП одной из основных задач является расчет характеристик электрического поля этих конденсаторов как в однородной, так и гетерогенной средах.

### **1.3. Особенности применения электроемкостных преобразователей**

Основной особенностью конструкций преобразователей является наличие неоднородности электрического поля в рабочем пространстве преобразователя. Это обстоятельство обуславливает ряд явлений, учет которых необходим как при конструировании, так и при эксплуатации измерительной аппаратуры с ЭП. Использование ЭП характеризуется целым рядом особенностей: неоднородности полей, соотношения рабочей и паразитной емкостей, зависимость емкостей от влияющих факторов (температуры, давления, внешних полей и др.). Поля ЭП неоднородны как по глубине, так и по ширине области контроля. Поэтому:

1) если при разрушающих испытаниях объем исследуемой среды известен точно, то в случае неразрушающего контроля границы участка диэлектрика, находящегося в рабочей зоне конденсатора, можно указать лишь весьма условно и погрешность контроля в значительной степени может зависеть от сопоставимости исследуемого объекта с размерами зоны контроля;

2) участки контролируемой среды, находящиеся в разных местах контролируемого объема, оказывают различное влияние на результат измерения, который можно рассматривать как среднее значение в определенном объеме материала в случае его однородности;

3) благодаря максимальному значению напряженности поля непосредственно у поверхности электродов одним из источников погрешностей может являться неплотное прижатие электродов ЭП к контролируемой поверхности или ее неровности.

Вынесение преобразователя с помощью простейших средств, например коаксиального кабеля, является причиной возникнове-

ния таких нежелательных явлений, как параллельное подключение к преобразователю больших паразитных емкостей, изменение их в процессе измерения и др. Одним из вариантов решения данной проблемы могут служить так называемые трехзажимные преобразователи, включаемые в самоуравновешивающиеся коммутационные мосты, мосты с индуктивно-связанными плечами или вынесение части измерительной схемы, например куиметра.

#### **1.4. Определение рабочих и паразитных емкостей электроемкостных преобразователей**

Выбор методики неразрушающего контроля тех или иных характеристик тесно связан с конструкцией ЭП. Основными элементами преобразователей всех конструкций, независимо от назначения и методики определения диэлектрических характеристик, являются электроды, с помощью которых и осуществляется неразрушающий контроль. Роль электродов выполняют плоские, прямые или концентрические пластины, накладываемые на плоскую или криволинейную поверхность контролируемого изделия. Состояние поверхности электродов должно отвечать десятому классу чистоты. Ширина и длина электродов, расстояние между ними, их число определяются в зависимости от заданной чувствительности, рабочей емкости конденсатора, ГЗК или ШЗК и других характеристик ЭП.

При однопараметровом контроле выходным сигналом ЭП является одномерная скалярная величина, например емкость или тангенс угла потерь преобразователя. Для определения физических или геометрических характеристик объекта контроля необходимо знание емкости или потерь, обусловленных рабочим пространством ЭП, которое заполняется исследуемым материалом, т. е. необходимо знать рабочую емкость ЭП. Непосредственное измерение этих составляющих затруднено, так как электрическое поле существует и в других участках пространства, окружающего электроды. Поэтому характер подключения ЭП играет основополагающую роль при выборе методики определения диэлектрических характеристик.

Рассмотрим способы определения рабочей и паразитной емкостей ЭП. Известен так называемый расчетный способ [17]. Он

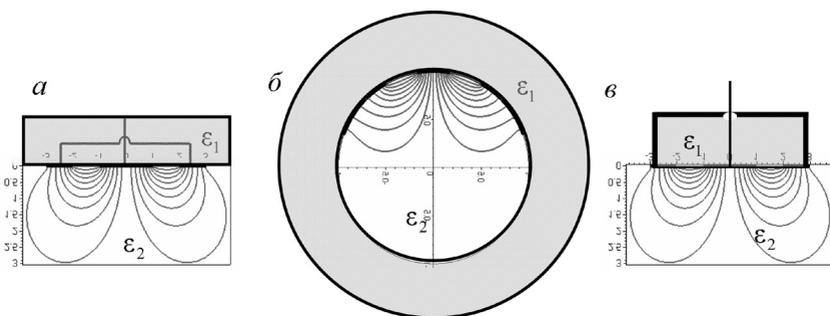


Рис. 1.1. Конструкции емкостных преобразователей: *a*, *б* – с электродами из проводящей фольги; *в* – с жесткими электродами

предусматривает расчет рабочей и паразитной емкостей. Основные положения расчетного способа сводятся к следующему:

- 1) поверхность контролируемого объекта должна иметь форму, соответствующую расчетной модели, для которой найдены расчетные значения емкости преобразователя;
- 2) толщина контролируемого материала и свободное пространство над электродами должны иметь размеры, превышающие ГЗК для данной конструкции преобразователя;
- 3) измерительная схема должна подключаться с помощью по возможности тонких и перпендикулярно отходящих от контролируемой поверхности проводов.

В случае НИК, изображенных на рис. 1.1, входную комплексную емкость можно представить в виде

$$C = \varepsilon_0 l (A_1 \tilde{\varepsilon}_1 + A_2 \tilde{\varepsilon}_2), \quad (1.2)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – геометрические коэффициенты верхнего (паразитного) и нижнего (рабочего) полупространств;  $l$  – длина электродов;  $\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2$  – комплексные диэлектрические проницаемости материалов, заполняющих паразитное и контролируемое полупространства;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Подставляя в (1.2) значения составляющих комплексных диэлектрических проницаемостей, получаем выражения для определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь исследуемого материала [17]:

$$\varepsilon_2 = \frac{C}{\varepsilon_0 l A_2} - \frac{\varepsilon_1 A_1}{A_2}, \quad (1.3)$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \operatorname{tg} \delta_3 \left( 1 + \frac{A_1 \varepsilon_1}{A_2 \varepsilon_2} \right) - \frac{A_1 \varepsilon_1}{A_2 \varepsilon_2} \operatorname{tg} \delta_1, \quad (1.4)$$

где  $\operatorname{tg} \delta_3$  – входное измеренное значение тангенса угла потерь измерительного конденсатора с исследуемым материалом;  $\operatorname{tg} \delta_1$  – тангенс угла потерь материала, заполняющего паразитное полупространство.

Для плоских и цилиндрических поверхностей в воздухе выражения (1.3) и (1.4) упрощаются: геометрические коэффициенты обоих полупространств  $A_1 = A_2 = A$  одинаковы. Так как в воздухе диэлектрическими потерями можно пренебречь, то

$$C_p = \varepsilon_0 \varepsilon_2 A l; \quad C_n = \varepsilon_0 \varepsilon_1 A l. \quad (1.5)$$

Другой разновидностью накладных измерительных конденсаторов у которых определение паразитных емкостей возможно расчетным путем, являются преобразователи, представленные на рис. 1.1, *в*. Electroды (высоко- и низкопотенциальный) преобразователей закреплены на изоляционном основании, входящем в область, создающую паразитную емкость. Все конструктивные узлы высокопотенциального электрода экранированы и заключены в заземленный корпус, с которым связан низкопотенциальный электрод [17].

Существенными недостатками расчетного способа являются, во-первых, зависимость точности определения рабочей емкости от точности расчетов емкости датчика, частично заполненного эталонным веществом; во-вторых, невозможность точного расчета емкости для всех конфигураций электродов датчиков; в-третьих, влияние паразитной индуктивности на частотах свыше 1 МГц [97]. Теоретические выражения, учитывающие влияние паразитной индуктивности, известны только для простейших форм проводников, например для прямого провода круглого или прямоугольного сечения, витка и др.

Однако конструкции преобразователей могут быть настолько сложными, что проведение расчетов становится нецелесообразным. В этом случае используют либо экспериментальные, либо полужабуриентальные способы определения рабочей емкости. В по-

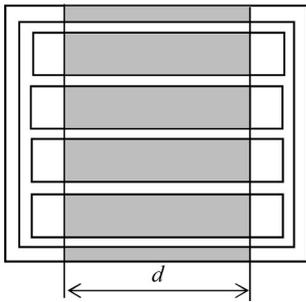


Рис. 1.2. К определению рабочей и паразитной емкостей конденсатора

дуэкспериментальных способах из всего пространства рабочей области преобразователя выделяют участок длиной  $d$  (рис. 1.2), для которого рабочая емкость  $C_0$  может быть определена расчетным путем [98]. В последующем этот участок, а также все рабочее пространство поочередно заполняются эталонной средой. Замеряются три значения емкости: незаполненного преобразователя  $C_1$ , частично заполненного  $C_2$  и заполненного преобразователя  $C_3$ . На основании полученных значений емкостей вычисляются рабочая емкость преобразователя  $C_p$  и паразитная емкость  $C_n$ :

$$C_p = \frac{C_3 - C_1}{C_2 - C_1} C_0, \quad C_n = C_1 - C_p. \quad (1.6)$$

Такая методика обладает следующими недостатками: она предполагает, что, во-первых, на границах раздела участков не происходит искажения электрических полей; во-вторых, идентичность условий заполнения и, в-третьих, возможность достоверного расчета рабочей емкости выбранного участка.

Для устранения этих недостатков используют экспериментальные способы определения рабочих и паразитных емкостей. Наиболее простым является экспериментальный способ, когда рабочее пространство преобразователя заполняют эталонным диэлектриком [17]. В качестве эталонных диэлектриков могут быть как жидкие, так и твердые среды. Этот способ носит название «способ сравнения» [17]. Он реализуется следующим образом: вначале замеряется емкость незаполненного эталонным материалом конденсатора (диэлектрическая проницаемость воздушного пространства  $\epsilon_v = 1$ )

$$C_{01} = C_p + C_{1n}, \quad (1.7)$$

а затем заполненного

$$C_{02} = \epsilon_2 C_p + C_{2n}, \quad (1.8)$$

где  $C_{1n}, C_{2n}$  – емкости, обусловленные паразитными параметрами;  $\epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость эталонного материала.

Находя разность (1.8) и (1.7) при условии равенства значений паразитных параметров  $C_{1n} = C_{2n}$  незаполненного и заполненного конденсаторов, получают значение рабочей емкости преобразователя

$$C_p = \frac{C_{02} - C_{01}}{\epsilon_2 - 1}. \quad (1.9)$$

Для обеспечения равенства паразитных емкостей конструкции необходимо, чтобы граница эталонного диэлектрика в рабочем пространстве конденсатора совпадала с плоскостью силовых линий электрического поля. Недостатком такой методики является наличие эталонных диэлектриков с известной диэлектрической проницаемостью, погрешность определения которой входит в погрешность определения рабочей емкости.

Наряду со способом сравнения существуют экспериментальные способы, не требующие наличия эталонных диэлектриков и проведения расчетов [99]. В одном из них используются зеркально-симметричные проходные преобразователи. Они представляют собой систему плоских зеркально-симметричных относительно плоскости контроля накладных измерительных конденсаторов (рис. 1.3, а) НИК. Изготовление зеркально-симметричных НИК возможно пу-

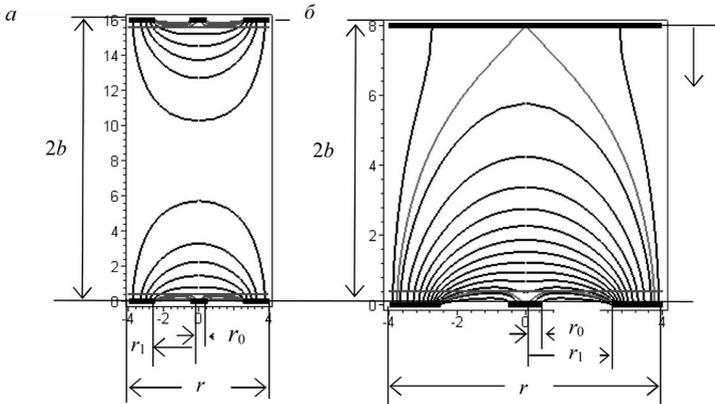


Рис. 1.3. Картина расположения силовых линий для НИК: а – зеркально-симметричных НИК; б – НИК и плоского проводника

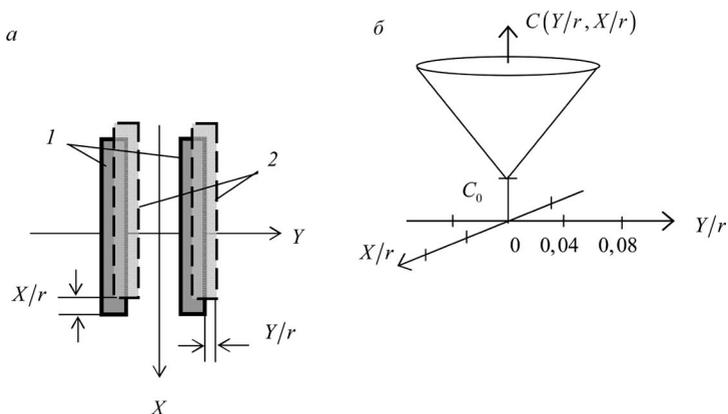


Рис. 1.4. Зеркальное совмещение НИК: *a* – зеркально-совмещенные НИК (1, 2 – нижняя и верхняя пары НИК); *b* – рельеф минимизируемой функции  $C(Y/r, X/r)$

тем напыления с использованием одной и той же маски либо разметкой относительно опорных линий (опорные линии следует выполнять в виде перекрестных линий). В силу симметрии рабочие емкости изготовленных НИК будут равны. Для зеркального наложения контуров электродов используют микроскоп с подвижным столиком. Подвижный столик позволяет ориентировать один контур электродов относительно второго. Зеркальная симметрия достигается поэтапно. В начале с помощью винта тубуса микроскопа совмещают опорные линии НИК, затем с помощью микрометрических винтов столика добиваются зеркального совмещения НИК. Если наложение зеркально (рис. 1.4, *a*), то значение емкости  $C_0$  двух НИК минимально: смещение одного из контуров влево-вправо вызовет увеличение емкости (рис. 1.4, *b*). Действительно, если контуры электродов не совпадают, то это соответствует преобразователю с большей площадью электродов и меньшим межэлектродным расстоянием, а следовательно, с более высокой емкостью [99]. При зеркальном совмещении НИК их рабочие емкости становятся равными нулю. Емкость  $C_0$ , полученная в этом случае, обусловлена потоками вектора напряженности электрического поля в подложках НИК и является паразитной. Измерив, таким образом, паразитную емкость  $C_0$ , затем можно легко определить рабочую емкость  $C_p$  НИК. Для этого разносят плоскости НИК и измеряют

суммарную емкость  $C_z$  двух независимых НИК. Рабочую емкость каждого из НИК вычисляют как

$$C_p = 0,5(C_z - C_0). \quad (1.10)$$

Рабочие емкости для пятисекционного НИК ( $r_0 = 2,5$  мм;  $r_1 = 7,5$  мм;  $r = 10,0$  мм;  $l = 6$  см), измеренные на основе эталонного диэлектрика, в качестве которого бралось трансформаторное масло ( $\epsilon = 2,24$ ), и изложенным выше способом, дали хорошее совпадение результатов для НИК, измеренных согласно изложенной методике, –  $C_1 = C_2 = 1,56$  пФ, а с использованием эталонного диэлектрика –  $C_1 = 1,57$  пФ и  $C_2 = 1,59$  пФ [99].

В случае сравнительно больших межэлектродных зазоров между электродами преобразователей, когда  $r_1 - r_0$  много больше толщины имеющегося в наличии плоского диэлектрика, можно воспользоваться следующим способом определения рабочих и паразитных емкостей [100]. Для этого рабочую область накладного измерительного конденсатора (рис. 1.5, а) заполняют тонким слоем диэлектрика. Это может быть полимерная пленка толщиной в несколько микрон. На нее накладывают плоский заземленный экран, потенциал которого равен нулю (рис. 1.5, б). Заземленный экран

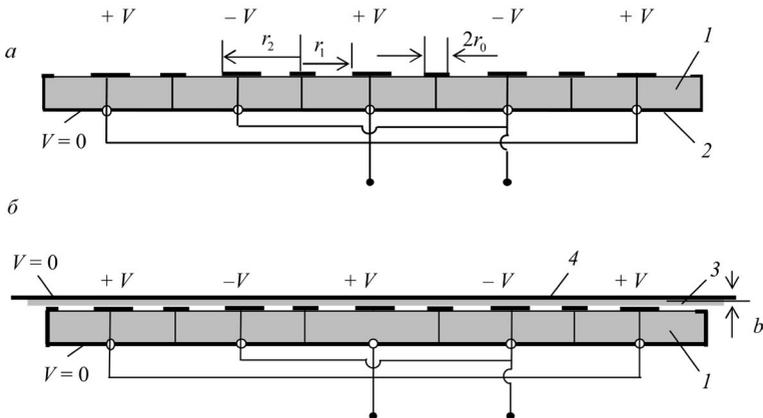


Рис. 1.5. Плоский многосекционный накладной измерительный конденсатор: а – без заземленного экрана (1 – подложка; 2 – заземленный корпус НИК); б – с заземленным экраном (3 – диэлектрическая пленка; 4 – заземленный экран);  $V$  – потенциал электродов

отсекает поток вектора напряженности над поверхностью электродов, устраняя тем самым рабочую область контроля из процесса измерения емкости. Расчеты показывают, если толщина пленки в 5 раз меньше ширины межэлектродных зазоров  $r_1 - r_0$ , то емкость, создаваемая пленкой, составляет на единицу длины порядка  $10^{-8}$  пФ/м и исключается из области контроля в силу того, что это значение меньше погрешностей измерительных схем, реализующих высокую точность измерения емкости. Этот факт подтверждает и изменение материала пленки. В результате емкость полученной системы будет определяться только емкостью подложки, которая является паразитной. Измерив паразитную емкость  $C_n$ , можно определить рабочую емкость конденсатора. Для этого отдельно измеряют емкость пустого накладного измерительного конденсатора (диэлектрическая проницаемость воздуха практически равна единице). Полученное значение емкости  $C_{p+n}$  будет равно сумме рабочей и паразитной емкостей. Следовательно, рабочая емкость  $C_p$  накладного измерительного конденсатора будет определяться как

$$C_p = C_{p+n} - C_n. \quad (1.11)$$

Так как для реализации способа нет необходимости в предварительном расчете емкости накладного измерительного конденсатора, то он применим для определения рабочих емкостей плоских НИК с любой конфигурацией электродов, когда выполнить расчеты емкости с заданной точностью невозможно. Рабочая емкость для пятисекционного НИК ( $r_0 = 2,5$  мм;  $r_1 = 7,5$  мм;  $r = 10,0$  мм;  $l = 6$  см), измеренная с использованием пленки из полиэтилена ( $\epsilon = 2,16$ ) толщиной 100 мкм, оказалась равной  $C_p = 1,59$  пФ [100].

Рассмотренный способ имеет следующие преимущества:

- 1) значительно сокращается время определения рабочей емкости, т.к. нет необходимости расчета частичных емкостей;
- 2) позволяет измерять паразитные и рабочие емкости для плоских накладных измерительных конденсаторов независимо от состояния поверхности и толщины электродов, их конфигурации.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
--------------------------	---

## *Глава 1*

<b>Общие свойства электроемкостных преобразователей</b> .....	5
1.1. Применение электроемкостных преобразователей .....	5
1.2. Основные характеристики электроемкостных преобразователей ..	9
1.3. Особенности применения электроемкостных преобразователей ...	12
1.4. Определение рабочих и паразитных емкостей электроемкостных преобразователей .....	13
1.5. Определение глубины зоны контроля электроемкостных преобразователей .....	21
1.6. Определение ширины зоны контроля электроемкостных преобразователей .....	38

## *Глава 2*

<b>Конструкции электроемкостных преобразователей</b> .....	43
2.1. Конструкция двухэлектродного НИК .....	44
2.2. Конструкция экранированного НИК .....	48
2.3. Многосекционные конструкции НИК .....	51
2.4. Накладные измерительные конденсаторы сложных конструкций ..	54
2.5. Преобразователи с дугообразными электродами .....	65
2.6. Трехзажимные накладные преобразователи .....	77
2.7. Трехзажимные накладные преобразователи с цилиндрическими охранными электродами .....	88
2.8. Трехзажимные преобразователи с дугообразными электродами ..	93
2.9. Проходные преобразователи .....	99
2.10. Проходные преобразователи для контроля поперечных размеров проводников .....	103

### Глава 3

<b>Системы плоских накладных преобразователей</b> . . . . .	118
3.1. Трехзажимные экранированные накладные преобразователи. . . . .	118
3.2. Трехзажимные многосекционные экранированные накладные преобразователи с дополнительным экранным электродом. . . . .	130
3.3. Расчет конструкций зеркально-симметричных НИК . . . . .	150
3.3.1. Элементарные конструкции зеркально-симметричных преобразователей . . . . .	151
3.3.2. Симметричная система трехэлектродного зеркально-симметричного преобразователя . . . . .	161
3.3.3. Многосекционные зеркально-симметричные НИК . . . . .	169
3.3.4. Трехзажимные зеркально-симметричные преобразователи . . . . .	177
3.3.5. Многосекционные трехзажимные зеркально-симметричные НИК . . . . .	191
3.3.6. Погрешности расчета рабочих емкостей зеркально-симметричных и экранированных НИК . . . . .	208

### Глава 4

<b>Общие закономерности контроля анизотропии ортотропных материалов</b> . . . . .	220
4.1. Определение анизотропии диэлектрических свойств с помощью НИК. . . . .	221
4.2. Определение анизотропии диэлектрических свойств с помощью экранированных НИК. . . . .	233
4.3. Определение анизотропии диэлектрических свойств с помощью зеркально-симметричных НИК. . . . .	240

### Глава 5

<b>Математические модели преобразователей</b> . . . . .	247
5.1. Метод зеркальных отображений . . . . .	247
5.2. Метод, основанный на решении задачи Дирихле для уравнения Лапласа . . . . .	258
5.3. Расчет электростатической емкости зеркально-симметричных преобразователей с использованием интегральных уравнений Фредгольма первого рода . . . . .	264
5.4. Математическая модель экранированного накладного измерительного конденсатора . . . . .	277
5.5. Математическая модель трехзажимного многосекционного зеркально-симметричного НИК . . . . .	286
5.6. Кольцевые НИК. . . . .	292
5.7. Зеркально-симметричные кольцевые НИК . . . . .	302

5.8. Прходной преобразователь с охранным кольцевым электродом . . .	305
5.9. Преобразователи с электродами дугообразного сечения . . . . .	310
5.10. Многосекционные трехзажимные преобразователи с электродами дугообразного сечения . . . . .	314
5.11. Расчет потенциала и напряженности поля в слоистых средах . . . .	324
5.12. Преобразователи с несовершенными диэлектриками . . . . .	329
5.13. Сходимость численных решений нахождения емкости преобразователей с точным значением . . . . .	334
<b>Литература</b> . . . . .	337

Научное издание

**Джежора** Александр Александрович

**ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА**

Редактор *И. А. Старостина*

Художественный редактор *Т. Д. Царева*

Технический редактор *Т. В. Летьен*

Компьютерная верстка *Н. И. Кашуба*

Подписано в печать 25.01.2008. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. офсетная № 1. Гар-  
нитура Times ET. Усл. печ. л. 20,46. Усл. кр.-отг. 20,93 Уч.-изд. л. 16,7.

Тираж 150 экз. Заказ 31.

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорус-  
ская наука».ЛИ № 02330/0131569 от 11.05.2005 г. 220141, г. Минск,  
ул. Ф. Скорины, 40.

Отпечатано в РУП «Издательский дом «Белорусская наука».