

## **Глава 2. ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

**Джежора А.А., Рубаник В.В., Царенко Ю.В.**

*Институт технической акустики НАН Беларуси,  
Витебский государственный технологический университет  
г.Витебск, Беларусь, E-mail: ita@vitebsk.by*

### **Введение**

Задачи научно-технического прогресса неразрывно связаны с необходимостью повышения качества выпускаемой продукции, автоматизацией производства, с необходимостью развития и внедрения высокоэффективных не инвазивных методов и средств контроля. Сравнительно простая технология изготовления электроемкостных преобразователей (ЭП), невысокая себестоимость существенно расширили сферу их применения в осуществлении автоматизации самых разнообразных процессов в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности, медицине, повседневной жизни. Основой для получения первичной информации о технологических параметрах являются первичные электроемкостные преобразователи (ЭП). Именно от их метрологических характеристик и методов обработки измерительных сигналов зависит эффективность всей измерительной системы.

### **Направления отечественных и зарубежных исследований в области теории и практики применения электроемкостного метода контроля**

Разработка электроемкостного метода не инвазивного контроля связана с созданием электроемкостных преобразователей, позволяющих локализовать электрические поля на желаемом участке контролируемого изделия или области. Однако решение данной задачи сопровождается рядом трудностей, значительно ограничивающих использование всех возможностей электроемкостного способа относительно точности и информативности

Теоретические вопросы и практические аспекты применения электроемкостных преобразователей развиты несколькими научными школами. Наиболее обширные и глубокие исследования в области электроемкостного метода неразрушающего контроля были проведены в Латвии [1,2]. Почти одновременно аналогичные исследования проводились в Массачусетском технологическом институте [3,4]. В основном, они касались вопросов развития накладных преобразователей. Наряду с этими научными школами, исследования в области развития электроемкостных методов и средств контроля проводились другими научными группами в Украине [5, 6], России [7,8,9].

Разобщенность исследователей привела не только к разнообразию средств контроля, схем измерения, методов определения основных характеристик преобразователей, математических моделей, но и к различию таких основных терминов как накладной измерительный конденсатор (НИК), преобразователь, ширина секции НИК, взаимная частичная емкость [10]. Учитывая приоритет латвийской научной школы во многих вопросах, касающихся электроемкостного метода неразрушающего контроля, авторы придерживались понятий и терминов, введенных И. Г. Матисом [2].

По конструктивному признаку, в зависимости от взаимного расположения объекта контроля и электродов электроемкостных преобразователей, все конструкции подразделяют на две группы: накладные и проходные преобразователи. В накладных преобразователях электроды расположены только с одной стороны к поверхности области контроля, чаще всего в одной плоскости либо по криволинейной поверхности, повторяющей форму поверхности области контроля. Поля накладных преобразователей неоднородны и пронизывают область контроля только с одной стороны. В проходных преобразователях область контроля расположена между электродами, и поле пронизывает область контроля с двух сторон. Эти конструктивные особенности в значительной степени определяют функциональные возможности преобразователей, характер источников погрешностей и меры их устранения.

Большая часть работ касается накладных измерительных конденсаторов (НИК), англоязычное название fringingelectricfield (FEF) sensors или interdigital sensor



(межпальцевый датчик). Это связано с удобством их применения. Первоначально работы носили узкую направленность и касались однопараметрового контроля, когда контролируется один из параметров. Это либо диэлектрические свойства однородного материала, если он заполняет все рабочее пространство преобразователя, или же толщина контролируемого слоя, когда его диэлектрические свойства известны заранее. Однако целый ряд задач требует одновременного определения как диэлектрических свойств, так и толщины контролируемого образца. Для определения такого числа неизвестных величин необходимо иметь уже систему уравнений, построенную исходя из экспериментальных данных, с учетом физического и численного моделирования, решение которой бы являлось ответом на поставленные задачи. В многопараметровом контроле [2] в качестве параметров чаще всего выступают частота, амплитуда сигнала или комбинации этих параметров. Методам многопараметрового контроля за счет вариации глубины зоны контроля посвящены работы [11,12]. Теоретические вопросы и практические аспекты применения накладных электроемкостных датчиков с различной глубиной проникновения были развиты в работах [2, 13-16].

Очень широкое распространение получила диэлькометрия с использованием системы датчиков накладного типа, когда измерения диэлектрических свойств осуществляются с одной из сторон контролируемой области [15-17]. Преимущество этого метода в том, что за счет пространственного распределения электродов и за счет изменения частоты электрического поля, обеспечивается послойная информация, как о контролируемом материале, так и его диэлектрических свойствах. Так как изменения в диэлектрических свойствах обычно вызываются изменениями в различных физических, химических или структурных свойствах материалов, то диэлькометрические измерения являются эффективными средствами косвенной неразрушающей оценки интересующих параметров в различных производственных и научных исследованиях [5,18]. Накладные датчики для контроля химических и физических изменений жидких и твердых диэлектриков рассмотрены в работах [19,20].

Значительное число работ посвящено определению влажности материалов. В качестве первичных преобразователей для этих целей используются измерительные конденсаторы, выполненные в виде прямых, либо концентрических компланарных [21, 22, 23], гребенчатых [24], игольчатых электродов [25], накладываемых на контролируемую поверхность. В [26, 27] рассматриваются возможности контроля влажности по глубине, за счет вариации потенциала на дополнительном электроде.

Основным недостатком диэлькометрических влагомеров, построенных по однопараметровой измерительной схеме, является зависимость показаний:

- от внешних факторов колебаний температуры, влажности окружающей среды, внешних электромагнитных воздействий, влияния кумулятивного эффекта;
- от наличия инородных примесей;
- от толщины контролируемого слоя;
- от условий контакта преобразователя с контролируемой поверхностью для твердых материалов;
- от плотности сминаемых материалов, их массы;
- от ориентации вектора напряженности электрического поля преобразователя для анизотропных материалов.

Методики многопараметрового контроля, нашедшие применение в конструкции двухчастотного измерителя влажности [2], трехчастотного, предназначены для одновременного измерения двух параметров (состава и влажности). Они устраняют влияние плотности контролируемого материала, формовочных смесей на результат измерения. Однако эти методы не устраняют погрешности, вызванные различной ориентацией вектора напряженности электрического поля по отношению к осям анизотропии материала. Эти недостатки особенно ощутимо проявляются при контроле сминаемых материалов, таких как ткани, волокна, пряжа. Влагомеры ведущих фирм производителей гарантируют контроль влажности хлопка, льна в диапазоне измерения: от 5 до 30 % с абсолютной погрешностью  $\pm 2$  %.

Контроль влажности представляет собой частный случай более общей задачи контроля состава и структуры веществ. Решение этой задачи основано на зависимости комплексной диэлектрической проницаемости смеси от диэлектрической проницаемости и объемных концентраций отдельных компонентов [28]. Электроемкостный метод нашел широкое применение для контроля содержания связующего материала и наполнителя в армированных пластиках [29], состава полезных ископаемых [30], плотности [31].

Известны примеры использования электроемкостного способа для наблюдения за кинетикой некоторых физических и химических процессов, например, степени полимеризации [32], термической и механической обработки [33].

Электроемкостные средства контроля по чувствительности к линейным микро перемещениям уступают только лазерным интерферометрам. В тоже время они просты по конструкции, имеют малый вес, габариты, небольшое энергопотребление, обладают малой инерционностью. По этой причине электроемкостный метод нашел широкое применение в контроле геометрических размеров полимеров [34], диаметра и размеров поперечного сечения линейно-протяженных проводящих изделий [35], микро перемещений [36], в контроле шероховатостей электропроводящих и неэлектропроводящих поверхностей [37], формы (овальность, огранка, конусообразность, бочкообразность, седлообразность для цилиндрической поверхности, отклонения от плоскостности и прямолинейности, выпуклость и вогнутость для плоской поверхности), взаимного расположения поверхностей, уровня эрозии, износа, вибрации, силы, давления, твердости, механического напряжения, деформации, ускорения [38].

В фармацевтической промышленности электроемкостные датчики осуществляют разбраковку таблеток [39], оценивают, толщину фармацевтических покрытий [40]. В сельском хозяйстве датчики оценивают влажность зерна [41], почвы [42].

Микро электромеханические емкостные преобразователи, конструкции компланарных электродов широко используются в качестве микродвигателей как основные функциональные элементы микро электромеханических систем (MEMS) [43]. Концептуальные краткие обзоры технологии MEMS сделаны в работах [44]. Это связано с высокой чувствительностью емкости к изменению межэлектродных зазоров с большими значениями электростатических сил, возникающих при малых межэлектродных расстояниях. Энергоемкость таких двигателей в области малых мощностей значительно превосходит энергоемкость индуктивных аналогов.

К областям использования емкостных микро электромеханических преобразователей относятся: высокоточные позиционные электроприводы для изготовления устройств нано- и микросистемной техники, контроль и диагностика технического состояния объектов, системы неразрушающего контроля конструкций, системы навигации для авиационной и космической техники, системы безопасности транспортных средств и т. д. Основные узлы в датчиках давления, акселерометрах, гироскопах содержат емкостные микро электромеханические структуры [45].

Современные MEMS технологии позволили проектировать миниатюрные и полностью интегрированные химические датчики. Сенсорный элемент представляет собой конденсатор, состоящий из двух параллельных пластин с использованием химически чувствительного полимера как диэлектрика. При наличии конкретного вещества, определяемого при анализе, полимер разбухает, изменяя емкость сенсорного элемента. Это изменение и позволяет обнаруживать химически вредные и опасные химические реагенты [46].

Аналогичен принцип работы биосенсоров (биодатчиков). В качестве чувствительных элементов биодатчиков используют: антитела, клетки или ферменты. С помощью биодатчиков проводят идентификацию и измерения количества малейших концентраций различных веществ. По изменению импеданса, катализируемого ферментом, биодатчики быстро и точно обнаруживают содержание глюкозы, мочевины в сыворотке [47]. С развитием МЭМС технологий появилась возможность быстрого и точного определения уникальных физиологических данных человека, возможность проводить его биометрическую идентификацию. Кожа человека имеет определённые

температурные и электрические характеристики, поэтому дактилоскопические данные, снимаемые ёмкостным преобразователем (с элементами матрицы), при соприкосновении выступов папиллярного узора пальца отвечают живой ткани пальца в отличие от «классических оптических сканеров», что делает бесполезными попытки обмана считывателя с помощью муляжей.

В пищевой промышленности датчики контролируют качество продуктов питания, процессы обезвоживания, стерилизации, замораживания пищи, производят оценку влагосодержания в органическом материале, обнаруживают бактерии в воде [48], осуществляют оценку состояния кожи человека [49]. Проводят экспресс оценку степен свежести мяса в производстве, торговле, его жирности, содержания белка [50], обнаружения сальмонеллы в мясном продукте. Диэлькометрический метод контроля используют для обнаружения опасных биотоксинов в рыбе, мидиях, устрицах, крабах и других морепродуктах [51]. Не смотря на тривиальность решения задачи оценки биотоксинов в морепродуктах, электроемкостные датчики способны обнаруживать присутствие различных доз пролина и домоевой кислоты в образцах морепродуктов. Существует большая возможность использования датчиков для обнаружения опасных биологических агентов (бактерий, вирусов или токсинов) на продуктах питания. Биодатчики позволяют обнаруживать наличие взрывчатых веществ и наркотиков. Предполагается, что в будущем биосенсоры будут применяться в сельском хозяйстве, ветеринарии, в качестве средств защиты человека и окружающей среды (главным образом, для выявления загрязнений).

Огромный прорыв в разработке химических и биодатчиков произошел с применением наноматериалов и нанотехнологий. Внедрение nano частиц и nano материалов в различные органические и неорганические материалы (пленки) привело к созданию материалов с новыми свойствами, к существенному улучшению метрологических характеристик датчиков [53].

Развитие в последние годы новых подходов к обработке информации, связанной с взаимодействием электромагнитных полей с электропроводящими средами, привело к развитию электроимпедансной томографии. Она нашла применение в медицинской диагностике, промышленности, системах безопасности, позволила исследовать такие недоступные для традиционного радиозондирования среды как грунт, водная среда, биологические объекты. Электроимпедансный томограф позволяет визуализировать распределение электрического импеданса в сечении человеческого организма.

Электроемкостные методы явились основой развития современных микромеханических систем, RFID технологий, развития nano- и биосенсорики.

Большое число работ связано с учетом и контролем качества жидких углеводородов (бензинов и дизельных топлив). Эффективность сгорания топлива напрямую связана с эксплуатационными и экологическими характеристиками транспортных средств: детонационной стойкостью. Ее мерой служит октановое число для бензинов и цетановое для дизельных топлив [54]. Контроль детонационной стойкости без сжигания топлива, оценку наличия в топливе запрещенных стандартом кислородных и металлосодержащих присадок, повышающих октановое число, но ухудшающих экологические характеристики двигателей осуществляет диэлькометрический метод. Он является не инвазивным и позволяет выполнять коммерческий учет светлых нефтепродуктов (таких как бензины различных марок, дизельное топливо, керосин), посредством измерения уровня [55]. Отличительной особенностью электроемкостных устройств является: исключительная конструктивная простота; отсутствие подвижных частей; удобство монтажа; возможность использования в широком интервале температур и давлений; высокая чувствительность, малые габариты и масса; относительно высокое быстродействие и искробезопасность, низкая себестоимость. Электроемкостной метод контроля позволяет осуществлять контроль и учет качества, проводить мониторинг состояния нефтепродуктов, обеспечивая тем самым выполнение задач технологического управления.

Основные взаимосвязи емкостного метода контроля с современными направлениями развития науки изображены на рисунке 1 в виде схемы.

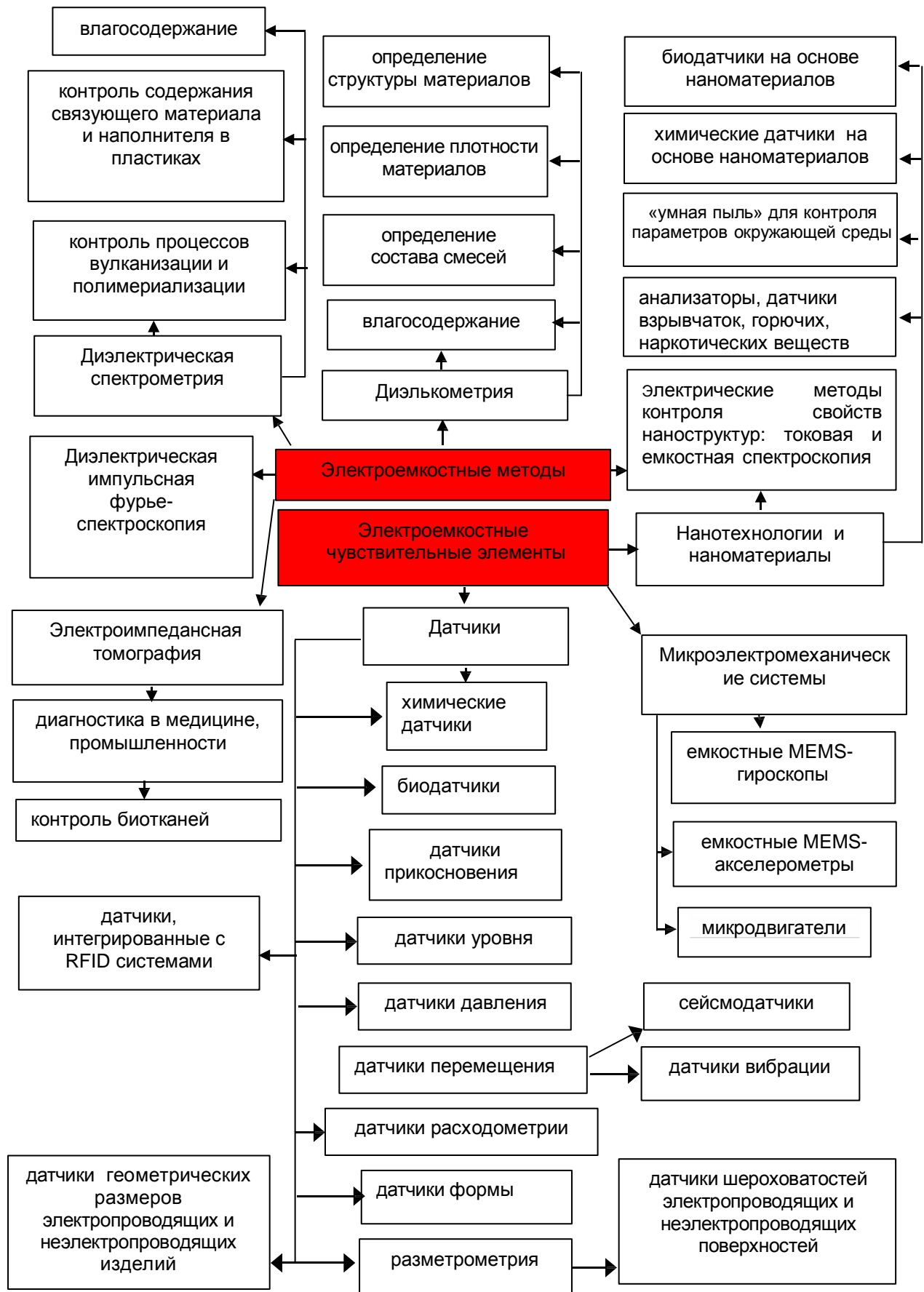


Рисунок 1 – Схема связей электроемкостного метода и емкостных чувствительных элементов с современными методами и технологиями

### Факторы и параметры, влияющие на характеристики электроемкостных преобразователей

Развитие электроемкостных методов и средств контроля неразрывно связано с расчетом электрических полей электроемкостных датчиков, их моделированием проектированием, решением обратных задач. Обоснованный выбор конструкции и характеристик преобразователя во многом определяет метрологические характеристики измерительного устройства, решает вопрос реализации технического задания. На рисунке 2 представлена схема факторов и параметров контролируемого объекта, влияющих на характеристики накладных электроемкостных преобразователей. Аналогичная схема соответствует и проходным преобразователям

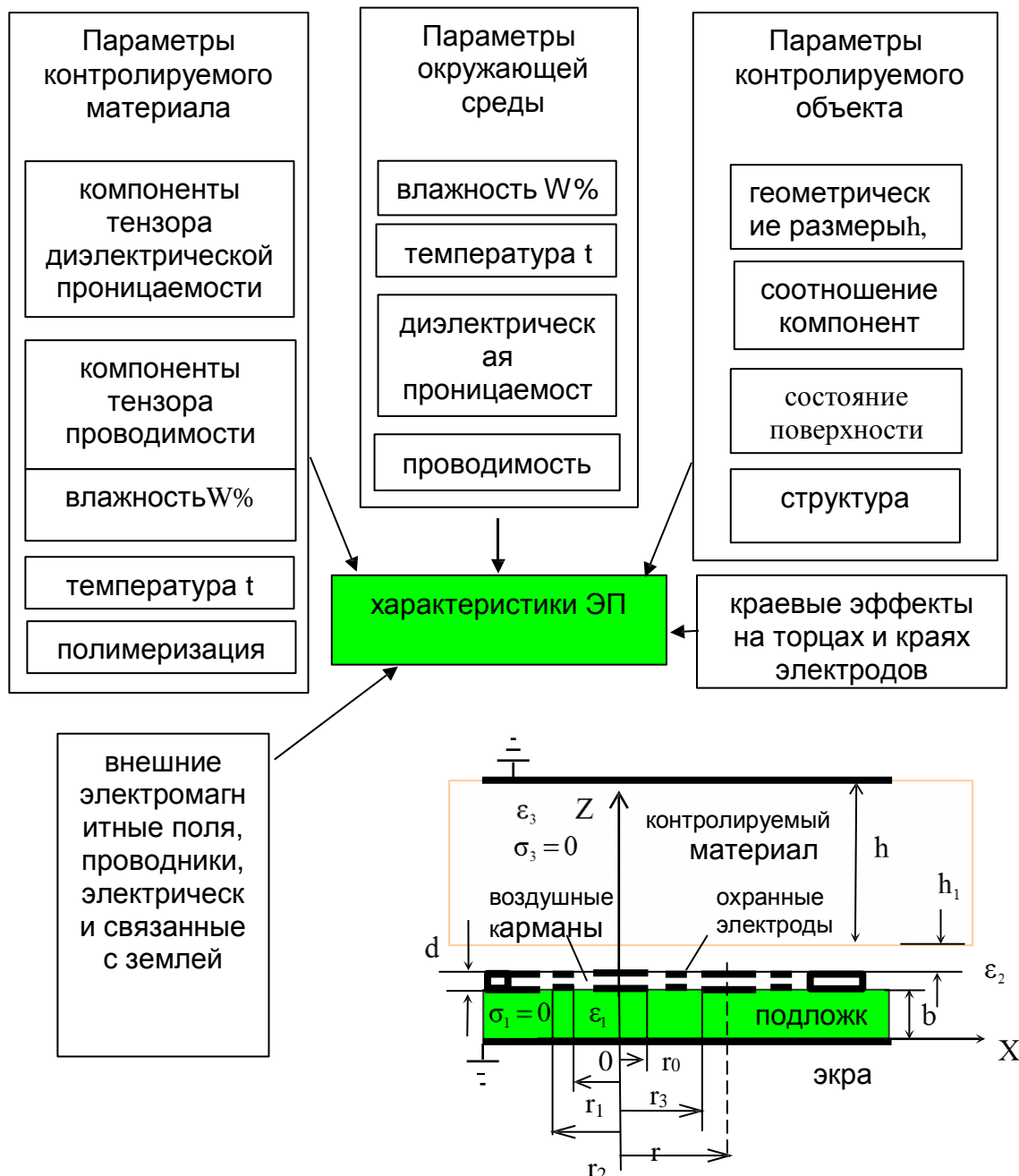


Рисунок 2 – Схема факторов и параметров материала, влияющих на характеристики емкостных преобразователей

с цилиндрической формой электродов. Дополнительные факторы будут касаться

нарушения соосности цилиндрических электродов, формы электродов и вариации этих параметров по длине преобразователей.

Число факторов и параметров, влияющих на характеристики электроемкостных преобразователей, более десятка. По этой причине процесс проектирования датчика [56] характеризуется значительным объемом и трудоемкостью, что с учетом сложности структуры объектов контроля, делает физическое моделирование трудноосуществимым, и основная нагрузка ложится на математическое моделирование, осуществляемое аналитическими либо численными методами. Аналитические модели для емкостных датчиков обычно базируются на упрощенных конфигурациях и идеализированных предположениях, которые ограничивают их точность расчета для реальных конструкций [57]. В моделях, построенных с использованием методов конформных преобразований [2, 57], непосредственного расчета напряженности электрического поля [57,8], континуума [58] или решения уравнения Лапласа с учетом граничных условий, электроды имеют нулевую толщину. Это допущение действительно, когда толщина электрода мала по сравнению с геометрическими размерами секции датчика или погонной длиной электродов. Для миниатюрных датчиков с конечной длиной и толщиной электродов указанные модели приводят к существенным расхождениям между теоретическими и экспериментальными данными. Поэтому основная нагрузка расчета электрических параметров ложится на численные методы расчета [56].

Численные методы расчета электроемкостных датчиков развиваются с середины 80-х годов прошлого века. С тех пор это направление превратилось в самостоятельную отрасль науки – вычислительную электродинамику. В настоящее время разработан и используется целый ряд коммерческих программ анализа и

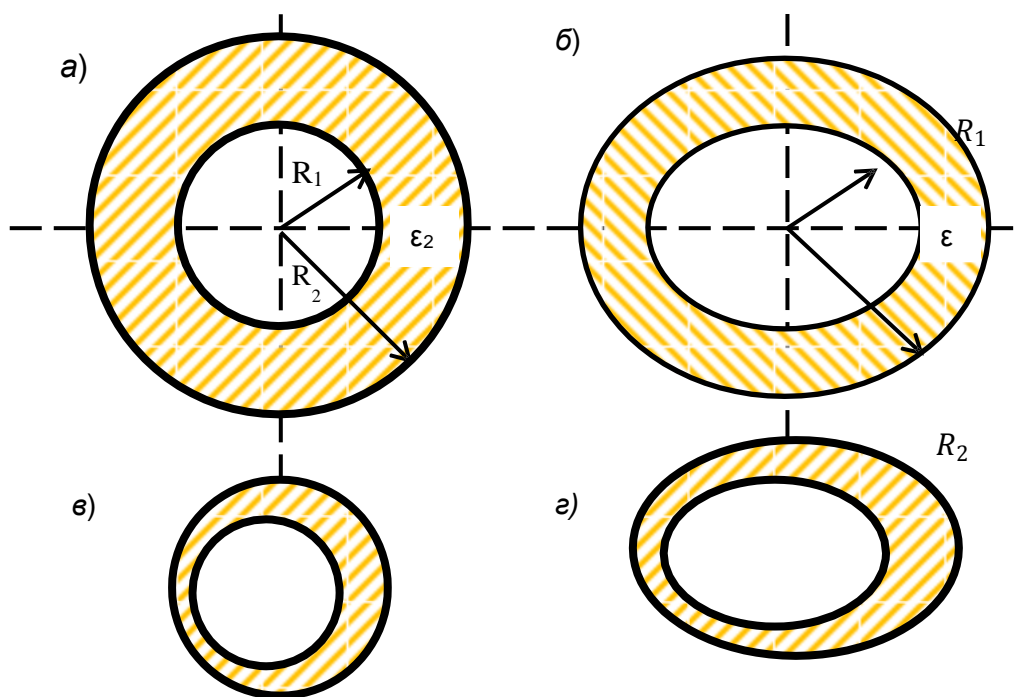


Рисунок 3 – Факторы и параметры, влияющие на характеристики емкостных цилиндрических преобразователей: а, б – нарушение формы; в, г – нарушение соосности электродов

оптимизации электродинамических систем (AnsoftFEM, ELCUT, CSTMicrowaveStudio, SPEAGSEMCAD и др.), позволяющий рассчитывать электромагнитные поля и параметры сложных электродинамических систем.

Среди численных методов, применяемых для расчета электроемкостных датчиков, следует выделить метод конечного элемента, известный как finiteelementmethod (FEM) [59]. Наиболее часто применяется пакет AnsoftMaxwell 2D,



позволяющий рассчитывать электромагнитные поля и параметры сложных электродинамических систем. Обладая мощным вычислительным ресурсом, этот метод позволяет проводить расчеты для моделей любой сложности, однако, он требователен к вычислительным ресурсам и требует значительного времени расчета. Менее требовательны к вычислительным ресурсам и значительно экономят время расчета методы, основанные на использовании интегральных уравнений Фредгольма первого рода [60], численные и приближенные способы, решения которых достаточно хорошо разработаны [2]. Обращаясь к методам расчета электрических полей, можно назвать также метод коллокации. В этом методе функция неизвестного потенциала в промежутке между электродами датчика аппроксимируется функцией, удовлетворяющей граничным условиям в отдельных точках на поверхности электродов [2]. Учет толщины электродов и воздушных зазоров осуществляется за счет введения в модель начального воздушного слоя – старта [21].

Несмотря на ряд математических моделей, используемых при практическом исполнении электроемкостных датчиков, часто возникают несоответствия между теоретическими и измеренными значениями импеданса, которые затрудняют интерпретацию полученных результатов, приводят к снижению эффективности электроемкостного способа контроля. Относительно малые несоответствия приводят к ошибкам. Самыми важными вкладчиками, приводящими к несоответствиям, являются толщина и длина электродов, вклад краевых эффектов на торцах электродов в емкость [61].

Существующие методики определения основных характеристик электроемкостных преобразователей (рабочая емкость, глубина зоны контроля, емкость вносимой торцами электродов преобразователя) [62] обладают следующими недостатками: трудоемкостью и продолжительностью определения характеристик. За рамками рассмотрения и решения оставим вопросы расчета емкостей зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов, вопросы моделирования их полей, оценки параметров, оптимизации их конструкций в силу их сложности. В тоже время, накладные измерительные конденсаторы представляют собой одну из составных частей зеркально-симметричных электроемкостных преобразователей. Так, экранированный накладной измерительный конденсатор с плоским заземленным экраном над поверхностью электродов (ЭНИК) (рисунок 2), может быть представлен в виде совмещенных плоских электродов зеркально-симметричного преобразователя, а накладной конденсатор представлен в виде двух идентичных накладных конденсаторов, разнесенных на расстояние, большее глубины зоны.

Теория накладных электроемкостных преобразователей и методы измерения на их основе хорошо развиты. Однако, вопросы проектирования и использования зеркально-симметричных преобразователей, многосекционных экранированных накладных измерительных конденсаторов (ЭНИК) требуют взвешенных продуманных решений.

### **Классификация электроемкостных преобразователей**

По характеру воздействия контролируемого объекта на выходной сигнал электроемкостные преобразователи подразделяют на следующие четыре группы:

а) преобразователи, контролирующие физико-химические свойства исследуемой жидкой среды и определяющие ее диэлектрическую проницаемость или коэффициент диэлектрических потерь. Выходной информативной характеристикой, в данном случае, является емкость или тангенс угла потерь преобразователя или частотные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса 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, электроемкостные преобразователи 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 электроемкостные преобразователи разделяют на две большие группы: накладные и проходные ЭП. В накладных ЭП электроды расположены только с одной стороны к поверхности объекта контроля, чаще всего в одной плоскости или по криволинейной поверхности, повторяющей форму поверхности объекта контроля. Для этого преобразователи выполняют на гибкой подложке. Исторически сложилось так, что накладные электроемкостные ЭП называют накладными измерительными конденсаторами (НИК) [2], англоязычный аналог *fringing electric field sensors (FEF sensors)* [21]. Поля накладных ЭП неоднородны и пронизывают объект контроля только с одной стороны. Объекты же контроля проходных ЭП расположены между электродами преобразователя. Самые простые примеры таких ЭП – плоскостные конденсаторы (конденсаторы Максвелл) с электродами в виде пластин либо колец, также коаксиальный цилиндрический конденсатор. Эти конструктивные особенности в значительной степени определяют функциональные возможности преобразователей, характер источников погрешностей и меры их устранения.

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

По характеру подключения ЭП подразделяются на двухэлектродные и трехэлектродные, трехзажимные преобразователи. Преимуществами трехэлектродных первичных преобразователей, по сравнению с двухэлектродными, являются высокая стабильность, помехоустойчивость.

### **Основные характеристики электроемкостных преобразователей**

При проектировании электроемкостных преобразователей необходимо предвидеть их основные характеристики:

а) составляющую межэлектродной емкости  $C_{12}$ , обусловленную потоком силовых линий электрического поля, замыкающимся через зону контроля (в процессе проектирования ЭП она подлежит максимизации);

б) паразитную составляющую межэлектродной емкости  $C_{12}$ , обусловленную потоком силовых линий электрического поля, замыкающимся через зону контроля и подложку (в процессе проектирования ЭП она подлежит минимизации);

в) паразитную емкость  $C_n$ , т. е. емкость, обусловленную потоком силовых линий электрического поля, замыкающимся в подложке на экран (в процессе проектирования ЭП она подлежит минимизации);

г) тангенс угла потерь незаполненного исследуемым материалом ЭП (в процессе проектирования ЭП подлежит минимизации);

д) глубину зоны контроля (ГЗК) и ее ширину (ШЗК) (требуют оценки исходя из размеров контролируемого ЭП участка исследуемого материала);

е) для аналитических моделей функцию преобразования – зависимость емкости (в более общем случае комплексной емкости) конденсатора от входных параметров, рассчитываются;

ж) частные производные по входным параметрам  $\frac{\partial C}{\partial r}$ ,  $\frac{\partial C}{\partial b}$ ,  $\frac{\partial C}{\partial \varepsilon}$ ,

рассчитываются;

з) распределение напряженности электрического поля в зоне контроля;

и) вклад краевого эффекта на торцах электродов в емкость ЭП;

к) нарушения соосности и формы цилиндрических оболочек (круговая цилиндрическая оболочка имеет тот же периметр поперечного сечения, что и эллиптическая оболочка);

л) вариации этих нарушений по длине электродов.

Параметры, указанные в пунктах а, б, в, важны при интерпретации физики явлений, происходящих в контролируемых образцах. Функция преобразования, частные производные (пункты д, е, ж) используются в задачах оптимизации конструкций электроемкостных преобразователей как для одно-, так и для многопараметрового контроля. Распределение напряженности поля (пункт з) дает представление о влиянии различных участков контролируемого объекта на результат контроля, дает представление о структуре и используется при осуществлении методики послойного контроля диэлектрических характеристик, изучении анизотропии плоских материалов. Пункты б, в указывают на влияние экрана подложки и толщины электродов на все вышеназванные характеристики ЭП. Тонкая подложка усиливает роль экрана и приводит к созданию виртуального охранного электрода между потенциальными электродами [62]. Пункт и важен при изучении анизотропии плоских материалов. Толщина электродов приводит к изначальному образованию воздушных карманов (воздушных полостей) в случае контроля твердых плоских диэлектриков. Пункты к, л указывают на влияние формы и соосности цилиндрических электродов на все вышеназванные характеристики ЭП (результаты некруговых оболочек необходимо контролировать с результатами эквипериметрических круговых оболочек). Их вариация по длине электродов может привести к ошибкам в определении уровня.

Одним из наиболее ответственных этапов при создании электроемкостных средств неразрушающего контроля является выбор размеров ЭП. Если при контроле с помощью проходных ЭП область контроля определена, то при контроле с помощью накладных измерительных конденсаторов (НИК) или FEFsensors она ограничена глубиной и шириной зоны контроля. Глубина зоны контроля показывает, как быстро интенсивность электрического поля уменьшается с увеличением расстояния от плоскости электродов датчика.

### **Особенности применения электроемкостных преобразователей**

Конструкциям электроемкостных датчиков и методикам измерения присущ целый ряд особенностей. Эти особенности требуют внимания как при конструировании, так и при эксплуатации измерительной аппаратуры с электроемкостными датчиками. Поля электроемкостных датчиков неоднородны по глубине и 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 датчика, можно указать лишь весьма условно, и погрешность контроля в значительной степени будет зависеть от сопоставимости размеров исследуемого объекта с размерами зоны контроля;

2) участки контролируемой среды, находящиеся в разных местах контролируемого объема, оказывают различное влияние на результат измерения;

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

4) стекание зарядов на края электродов приводит к неоднородностям электрического поля по периферии поверхности ЭП и, как следствие, к дополнительным неоднородностям поля;

5) отклонение полей от плоскопараллельных на концах электродов в пяточной части приводит к методической ошибке определения диэлектрической проницаемости анизотропных материалов, не позволяет интерпретировать результаты измерений;

6) основания подложек влияют на характер распределения электрического поля в рабочей области контроля;

7) на результат измерения влияют воздушные зазоры и включения у поверхности электродов;

8) на результат контроля влияет состояние поверхности (частицы пыли, шероховатости поверхности могут служить источником дополнительной погрешности измерения);

9) на результат контроля влияют внешние факторы, такие как температура, влажность воздуха, заряды статического электричества;

10) в анизотропных средах значения снимаемых сигналов зависят от ориентации вектора напряженности электрического поля.

Практическое выполнение ЭП показывает, что, несмотря на ряд математических моделей, существуют несоответствия между теоретическими и измеренными значениями импедансов. Несоответствия между теоретическими и измеренными значениями приводят к затруднению интерпретации полученных результатов, снижают эффективность электроемкостного способа контроля. Самыми важными вкладчиками, приводящими к несоответствиям, являются краевые эффекты на торцах электродов, толщина электродов [62]. Явно эти несоответствия начинают проявляться для миниатюрных преобразователей, когда длина электродов сравнима с шириной самого многосекционного преобразователя, в датчиках уровня жидких сред, когда краевые эффекты оказывают влияние на начало отсчета уровня. При контроле анизотропии ортотропных сред краевые эффекты на торцах электродов приводят к дополнительным погрешностям.

### **Методология неразрушающего контроля анизотропии структуры полимерных материалов**

При контроле качества полимеров и изделий из них наиболее ответственным и сложным этапом является диагностика показателей их прочности и жесткости по комплексу физических параметров, с использованием статистических и феномено-статистических методов. Рассматриваемый комплекс параметров включает параметры материалов, неразрушающий контроль которых требует значительных усилий. Одними из таких параметров являются значения тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ij}$ , проводимости  $\sigma_{ij}$ , тангенса потерь  $\operatorname{tg} \delta_{ij}$  характеризующие анизотропию диэлектрических свойств. Эти параметры, несущие необходимую информацию о структуре материала, наравне с другими физическими и геометрическими характеристиками, могут использоваться для решения ряда самостоятельных задач контроля качества. 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 [61]. Одноосная анизотропия диэлектрических свойств встречается в ряде полимерных структур, в том числе используемых в MEMS, RFID технологиях.

Несмотря на кажущуюся простоту методики определения основных компонент тензора диэлектрической проницаемости, при практическом осуществлении ее возникает ряд затруднений. Значения компонент  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  для широкого класса материалов различаются незначительно. Поэтому погрешности, обусловленные воздушным зазором, краевыми эффектами на торцах электродов или неплотным прилеганием их к контролируемой поверхности, могут не только достигнуть недопустимых значений, но и качественно изменить представление об анизотропии исследуемого материала. В этой связи возникает необходимость в определении компонент тензора диэлектрической проницаемости без перестановки накладных

измерительных конденсаторов. Для решения этой задачи использовались устройства [61,63-65]. Изменение направления вектора напряженности электрического поля достигалось либо коммутированием электродов с помощью переключателя, либо применением двух накладных измерительных конденсаторов, электроды которых сдвинуты друг относительно друга на угол осей анизотропии (в частном случае для измерения ортогональной анизотропии на угол  $\alpha = 90^\circ$ ). В [62] показано, что более рационально измерение разности или отношения компонент коэффициентов анизотропии по сравнению с нахождением их абсолютных значений. В случае измерения разности высокая чувствительность измерительного устройства может быть достигнута в результате применения дифференциального способа измерения, а в случае отношения компонент – путем применения дискретных делителей сигналов. Определяя такими способами попарно две разности компонент или два отношения на основе точного значения одной из них, определенной в условиях, обеспечивающих наибольшую точность, можно рассчитать и остальные компоненты. Поскольку отдельные компоненты отличаются одна от другой всего на несколько процентов [2], т.е.  $\varepsilon_x \approx \varepsilon_y \approx \varepsilon_z$ , то погрешности измерения в соответствии с рассмотренной методикой равны разности погрешностей измерения абсолютных значений двух компонент. Оценивая применение накладных преобразователей для неразрушающего контроля анизотропии линейно-протяженных полотнообразных материалов, следует отметить, что в случае однопараметрового контроля, согласно методикам [2], получить достоверные результаты об анизотропии не представляется возможным. Это связано, в первую очередь, с задачей оптимизации конструкций преобразователей. Размеры электродов преобразователей должны быть выбраны таким образом, чтобы проникновение электрического поля преобразователя было меньше минимальной толщины материала и, следовательно, изменение толщины не сказывалось на результатах измерений. Во-вторых, большая часть тонких полимерных материалов (искусственные и синтетические кожи, пленки, покрытия, ткани, картон, стеклопластики и т.д.) имеют неквазигомогенную структуру. Неоднородности структуры могут быть

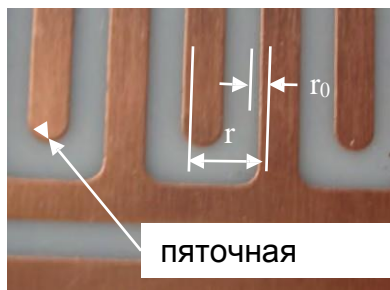


Рисунок 4 – Края электродов ЭП

сравнимы с толщиной материалов. В силу этого, выполнение узких ленточных электродов приведет к соразмерности неоднородностей и размеров накладных измерительных конденсаторов, а, следовательно, к методическим погрешностям измерения. Кроме того, у линейно-протяженных материалов нет доступа к двум ортогональным поверхностям, а это не позволит определять константы диэлектрической проницаемости согласно [2]. Отклонение полей от плоскопараллельных на концах электродов в пяточной части (рисунок 4) приводит к методической ошибке определения

диэлектрической проницаемости, не позволяет интерпретировать результаты измерений.

Емкостной метод контроля является не инвазивным и позволяет осуществлять диагностику прочностных и деформационных свойств материалов и изделий, изучать структуру контролируемых объектов в широком частотном диапазоне [63, 65, 66]. Исследованиям подвергались образцы искусственной кожи «NUBUK». Механические свойства ИК NUBUK изучались с помощью разрывной машины ИП 5158-5 на образцах прямоугольной формы 180x20 мм с рабочей частью 100x20 мм со скоростью перемещения нижнего зажима 70 мм/мин. Все образцы сканировались меандровым экранированным накладным измерительным конденсатором в направлении основы материала и поперек. В качестве измеряемого параметра бралась емкость накладного измерительного конденсатора, так как она является интегральной характеристикой и наиболее полно отражает прочностные и деформационные свойства контролируемых образцов. Установлено:

- материал NUBUK практически не обладает дисперсией диэлектрических свойств в частотном диапазоне  $10 \text{ кГц} \div 1 \text{ МГц}$ ;
- ему присуща слабая анизотропия диэлектрической проницаемости в плоскости материала. Коэффициент анизотропии не превышает 1,07;
- несмотря на архаичный характер строения материала NUBUK между емкостью датчика и разрывной нагрузкой  $P_p$  в направлении основы существует корреляционная взаимосвязь.

Оптимальная конструкция датчика была выполнена на подложке из тефлона ( $\epsilon =$



Рисунок 5 – Измеритель иммитанса E7-20 с датчиком

2,1) толщиной 2мм, его металлизация составила 0,5, ширина электродов 2мм, их толщина 30  $\mu\text{м}$ , погонная длина электродов составила  $l=140 \text{ мм}$ . К датчику подключался измеритель иммитанса E7-20 рисунок 5.

Современные искусственные кожи к по своим характеристикам близки к натуральным и восполняют их дефицит. Широкое применение ИК сдерживается нехваткой сведений об их физико-механических свойствах, а информация о структуре и сырьевом составе ИК иногда просто отсутствует. Исследование физико-механических свойств ИК для верха обуви, учет их деформационных свойств позволит производителям обуви более эффективно реализовать процесс формования заготовок верха обуви и тем самым улучшить потребительские свойства и качество выпускаемых изделий.

#### Неинвазивные методы учета и контроля качества нефтепродуктов

Развитие электроемкостных методов контроля неразрывно связано с разработкой методологии и соответствующего математического аппарата для решения прямых и обратных задач, т.е. методология должна опираться на адекватные математические модели, эффективные алгоритмы анализа экспериментальных данных, что требует развития теории и создания методик и алгоритмов моделирования электромагнитного поля электроемкостных преобразователей. Разберем математическую модель датчика уровня жидких сред цилиндрической формы с учетом реальных геометрических размеров

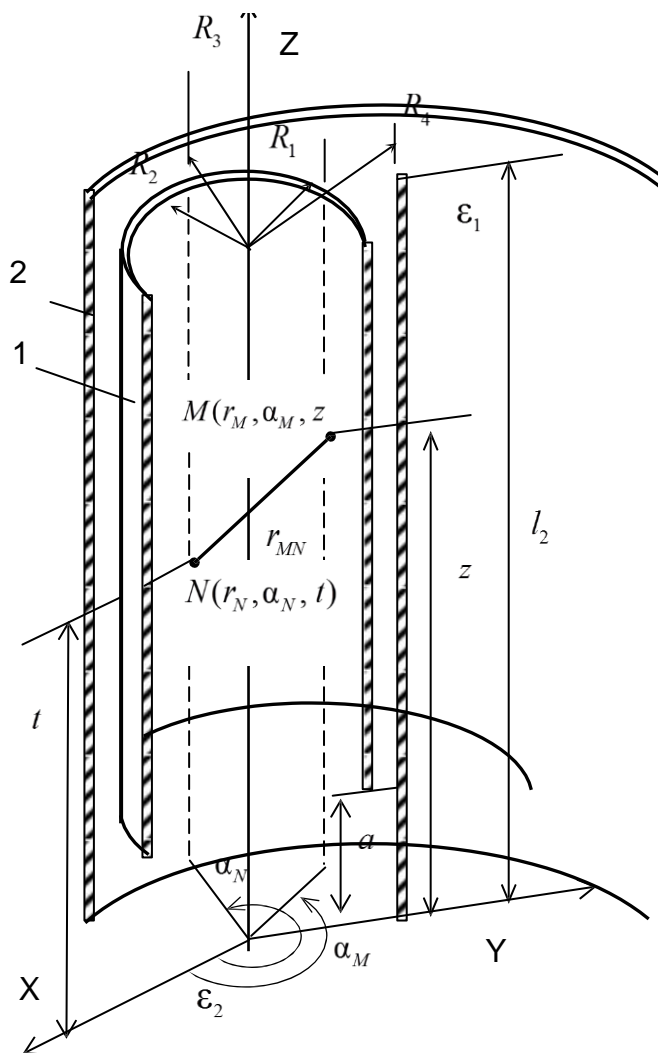


Рисунок 6 – Поперечное сечение цилиндрической формы конденсатора цилиндрической формы



электродов (рис. 6). Эта модель учитывает краевые эффекты на торцах электродов и позволяет оптимизировать конструкцию датчика. Поле цилиндрического конденсатора является осесимметричным и плоскопараллельным, за исключением поля на торцах. В силу этого поверхностная плотность заряда для каждой из эквипотенциальных поверхностей электродов цилиндрического датчика является функцией одной переменной  $t$  вдоль оси  $OZ \sigma_s(R_s, t)$ . В качестве исходного выражения при составлении интегральных уравнений использовалась зависимость для потенциала [64]:

$$V_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_1} \int_s \frac{\sigma(s)}{r_{MN}} ds, \quad (1)$$

где  $\sigma(s)$  - поверхностная плотность заряда на электродах.

С учетом того, что расстояние в цилиндрической системе координат между точкой наблюдения  $M(r_M, \alpha_M, z)$  и переменной точкой  $N(r_N, \alpha_N, t)$  определяется:

$$r_{MN} = \sqrt{(t-z)^2 + r_M^2 + r_N^2 - 2r_M r_N \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad (2)$$

система интегральных уравнений имеет вид:

$$\int_0^{L_m} \sigma_s(R_s, t) R_s dt \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{r_{MN_i}} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_1 V_m, \quad (3)$$

где  $R_s$  – радиусы внутренних и внешних поверхностей цилиндрических электродов,  $\sigma_s(R_s, t)$  – соответствующие им поверхностные плотности заряда,  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся электроды,  $V_m$  – потенциалы на электродах,  $s=1, 2, 3, 4$ ,  $m=1, 2$ . Высокопотенциальный электрод 1 имеет потенциал  $V_1$ , низкопотенциальный электрод 2 - потенциал  $V_2$ . Индекс  $s$  отвечает поверхности интегрирования,  $m$  - номеру электрода, для которого записывается выражение потенциала.

Основная идея заключалась в том, что при создании математической модели датчика каждый из электродов рассматривался в виде двух соосных бесконечно тонких цилиндрических

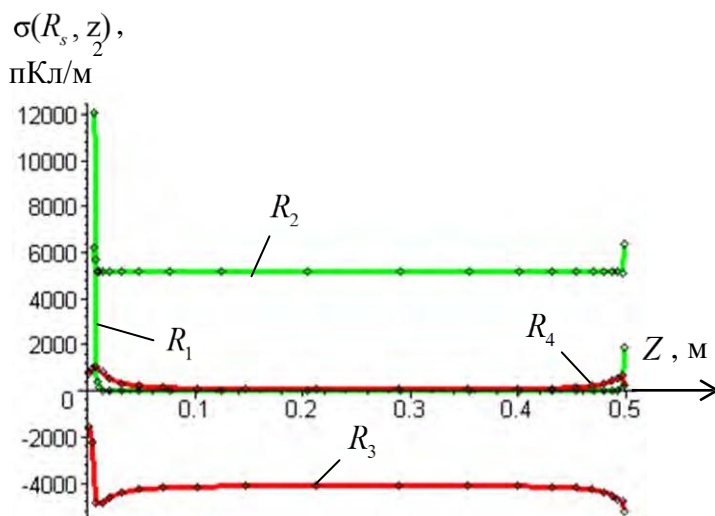


Рисунок 7 – расчетная картина распределения зарядов по поверхности электродов

эквипотенциальных поверхностей с различной плотностью заряда  $\sigma_s(R_s, t)$ . Такой подход позволил учитывать реальные геометрические размеры электродов, их толщину и исследовать характер распределения поля вне межэлектродного зазора. Расчетная картина распределения заряда по поверхности цилиндрических электродов для датчика с размерами электродов  $R_1 = 6$  мм,  $R_2 = 7$  мм,  $R_3 = 9$  мм,  $R_4 = 10$  мм,  $l_1 = 494$  мм,  $a = 6$  мм,  $l_2 = 500$  мм в воздухе ( $\epsilon_1 = 1$ ),

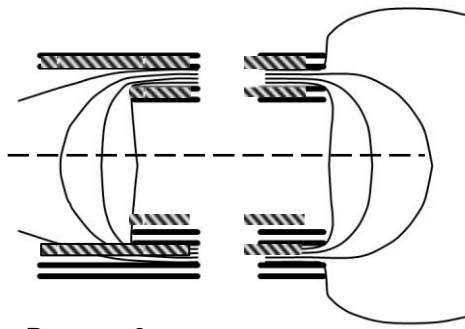


Рисунок 8 – расчетная картина эквипотенциалей поля цилиндрического конденсатора

представлена на рисунке 7. Из кривых распределения заряда по поверхности электродов видно, что поле сосредоточено в межэлектродном зазоре, охватываемом цилиндрическими поверхностями  $R_2$  и  $R_3$ . Поле однородно, за исключением поля на торцах электродов. В силу того, что низкопотенциальный электрод 2 имеет на левом торце большую длину на  $a=6$  мм, краевой эффект на левом торце меньше краевого эффекта на правом торце. Значения плотности заряда на левом торце  $\sigma(R_3, z \rightarrow 0)$  и  $\sigma(R_4, z \rightarrow 0)$  (кривые  $R_3$  и  $R_4$ )

значительно меньше значений плотности заряда на правом торце  $\sigma(R_3, z \rightarrow 0.5)$  и  $\sigma(R_4, z \rightarrow 0.5)$ . Кривая  $R_4$  соответствует распределению заряда по внешней поверхности,  $R_3$  – внутренней поверхности низкопотенциального электрода цилиндрического датчика. Поле практически отсутствует в области, охватываемой внутренней поверхностью высокопотенциального электрода радиуса  $R_1$  и вне цилиндрического датчика (кривая  $R_4$ ). На расстояниях  $4(R_3 - R_2)$  от торцов датчика функция распределение заряда по поверхности электродов принимает постоянное значение.

Для визуализации электрического поля выполнялся расчет эквипотенциалей в сечении датчика ( $\varepsilon_1=1$ ) рисунке 8. Расчет проводился после нахождения дискретных значений распределения поверхностной плотности заряда  $\sigma_i z$ . Для сравнения показана картина электрического поля не только в центральной части, но и на левом и правом торцах. Из расчетной картины электрического поля видно, что в центральной части поле однородно (эквипотенциальные линии параллельны поверхности цилиндров), на левом торце поле сосредоточено в пределах внутренней области низкопотенциального цилиндра, который выполняет экранирующее действие.

Аналитическое выражение емкости цилиндрического конденсатора:

$$C_d = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1 l / \ln R_3 / R_2 \quad (4)$$

не учитывает толщину электродов и полагает ее бесконечно малой по сравнению с радиусами цилиндрических электродов. Результаты численных и аналитических расчетов емкостей выполненных по классической формуле в воздухе ( $\varepsilon_1=1$ ), приведены в таблице 1. Здесь же представлены экспериментальные результаты. В моделировании использовались геометрические параметры датчиков с различной длиной электродов  $l_1$  и  $l_2$ . Внешние диаметры цилиндрических электродов измерялись с помощью микрометра в двух взаимно перпендикулярных направлениях - вдоль электродов с шагом равным шагу разбиения электродов на кольца. Внутренние диаметры измерялись с помощью штангенциркуля. Отклонения от средних значений радиусов составили не более 0,04 мм. Расхождения в вычислении емкостей  $C_d$ , разработанным численным методом, и  $C_A$  – с помощью аналитического выражения незначительны при длине электродов на порядок больше радиуса  $R_4$ . В области больших отношений  $R_4$  / классическое выражение не работает. Представляет интерес случай, когда торец электрода 1 утоплен  $l_2 > l_1$ . Экспериментальные результаты взаимосвязи уровня рапсового масла ( $\varepsilon_2=3,01$ ) и емкости датчика с геометрическими размерами электродов  $R_1=1,6$  мм,  $R_2=2,6$  мм,  $R_3=5,95$  мм,  $R_4=6,97$  мм,  $l_1=204$  мм,  $l_2=299$  мм представлены на рисунке 9. Так как длина дополнительного электрода  $l_1 < l_2$ ,



то до момента прохождения маслом уровня  $h < l_2 - l_1$  емкость датчика остается неизменной и определяется диэлектрической проницаемостью воздуха над уровнем жидкости. Датчик работает как индикатор уровня

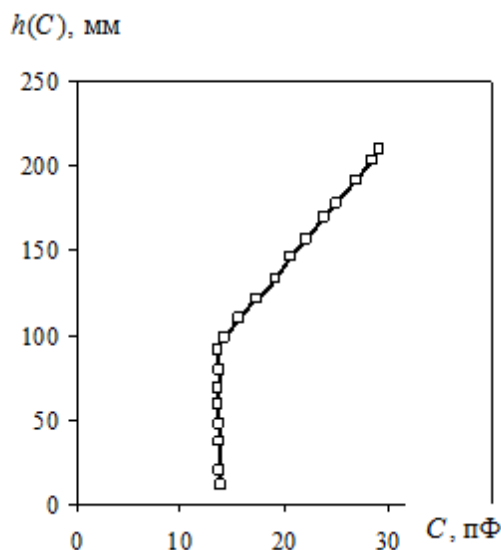


Рисунок 9 – экспериментальная взаимосвязь между высотой уровня жидкости  $h$  и емкостью цилиндрического датчика  $C$

Таблица 1 – Расчетные и измененные значения емкостей цилиндрического датчика  $C_{\text{ч}}$  – численные расчеты;  $C_{\text{А}}$  – аналитические расчеты

$R_1$ , мм	$R_2$ , мм	$R_3$ , мм	$R_4$ , мм	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм	$C_{\text{изм}}$ , пФ	$C_{\text{ч}}$ , пФ	$C_{\text{А}}$ , пФ	$\delta C_{\text{ч}}$ , %	$\delta C_{\text{А}}$ , %
5,95	6,955	8,90	9,99	490	490	111,17	110,92	110,49	0,22	0,60
5,95	6,955	8,90	9,99	485	490	109,65	109,49	109,36	0,14	0,25
5,97	6,975	8,90	9,99	320	320	73,55	73,50	73,01	0,07	0,73
5,97	6,975	8,90	9,99	320	323	73,65	73,25	73,01	0,54	0,87
5,97	6,975	8,90	9,99	320	390	73,77	73,37	73,01	0,54	1,03
5,97	6,975	8,90	9,99	98,30	98,30	22,93	22,83	22,43	0,44	2,19
5,97	6,975	8,90	9,99	30,09	30,1	7,67	7,59	7,05	1,04	10,46
5,97	6,975	8,90	9,99	20,03	20,0	5,23	5,14	4,63	1,72	11,44

Емкость датчика в этом случае:

$$C(h < l_2 - l_1) = 2\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_1 l_1}{\ln(R_3/R_2)}. \quad (5)$$

В момент прохождения уровня  $h = l_2 - l_1$  происходит излом графика, емкость датчика начинает возрастать:

$$C(h > l_2 - l_1) = 2\pi\epsilon_0 \left( \frac{\epsilon_2 (h - (l_2 - l_1))}{\ln(R_3/R_2)} + \frac{\epsilon_1 (l_2 - h)}{\ln(R_3/R_2)} \right). \quad (6)$$

Результаты проведенных исследований и проверка адекватности моделей цилиндрических конденсаторов экспериментальным данным позволила сделать следующие выводы:

- модель, построенная численным методом, включает в себя модель цилиндрического измерительного конденсатора с электродами равной длины, и модель цилиндрического измерительного конденсатора с утопленным центральным электродом, и позволяет проводить расчеты емкостей с высокой точностью;
- модель учитывает толщину и длину цилиндрических электродов датчика, позволяет исследовать характер распределения поля на торцах конденсатора вне межэлектродного зазора;
- для датчиков с длиной электродов  $l \geq 10 R_4$  применимо классическое выражение емкости цилиндрического конденсатора  $2\pi\epsilon_0\epsilon_1 l / \ln R_3/R_2$ .

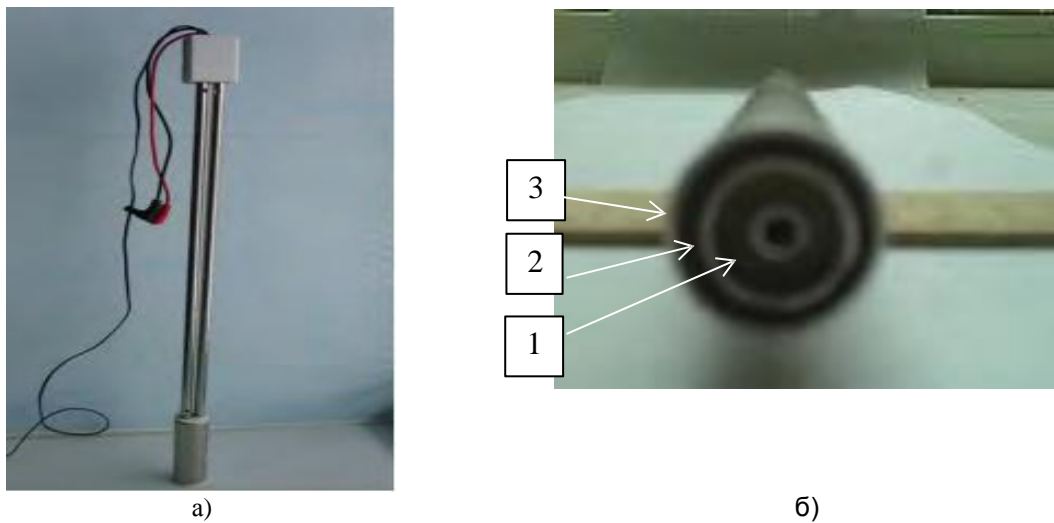


Рисунок 10 – двухканальные датчики, состоящий из: 1 – внутреннего цилиндра; 2 – среднего цилиндра; 3 – внешнего цилиндра

Так как диэлектрическая проницаемость топлива определяется сортностью, температурой топлива, наличием присадок, сторонних добавок, абсорбированной влаги, то погрешность определения уровня топлива посредством однопараметрового контроля велика и может достигать десятка процентов. Этого недостатка лишены двухканальные емкостные измерители уровня топлива [55, 64]. Они инвариантны к изменению относительной диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости. Конструктивно датчики представляют собой два коаксиальных цилиндрических конденсатора. В целях компактности конструкции он может быть выполнен в виде составного цилиндрического конденсатора рисунок 10 б. Длина внутреннего цилиндрического электрода 1 меньше длины охватывающих его цилиндрических электродов 2 и 3. Средний электрод 2 с помощью коммутатора попеременно подключается к окружающим его цилиндрическим электродам 1 и 3. Благодаря этому попеременно измеряются диэлектрические параметры (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_2$ , проводимость  $\sigma_2$ ) контролируемого топлива в объемах  $V_2 = \pi(R_5^2 - R_4^2)l_2$  и  $V_1 = \pi(R_3^2 - R_2^2)l_1$  двух цилиндрических конденсаторов длиной  $l_1$  и  $l_2$ . Для электродов цилиндрических датчиков, расположенных в двухслойной среде, система интегральных уравнений имеет вид:

$$\int_0^{L_s} \sigma_s(R_s, t) R_s dt \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{r_{MN_s}} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_q V_m, \quad (7)$$

где  $R_s$  – радиусы внутренних и внешних поверхностей цилиндрических электродов,  $\sigma_s(R_s, t)$  – соответствующие им поверхностные плотности заряда,  $\varepsilon_q$  – диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся электроды либо часть электродов,  $V_m$  – потенциалы на электродах,  $s = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ,  $m = 1, 2, 3$ . Высокопотенциальный электрод 1 имеет потенциал  $V_1$ , низкопотенциальный электрод 3 – потенциал  $V_3$ . Потенциал электрода 2 попеременно принимает значения потенциала первого электрода  $V_1$  затем третьего  $V_3$ . в случае  $V_2 = V_1$

$$C_2 = 2\pi l_2 \left( R_3 \sum_{i=4N_1+1}^{6N_1+2N_0} \sigma_i(\beta_i - \alpha_i) + R_4 \sum_{i=6N_1+2N_0+1}^{8N_1+4N_0} \sigma_i(\beta_i - \alpha_i) \right) / (V_2 - V_3) \quad (8)$$

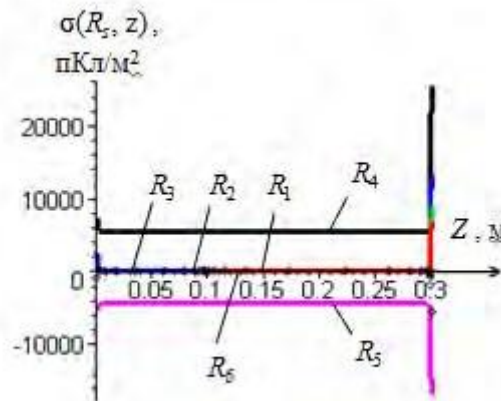


Рисунок 11 – расчетная картина распределения зарядов по поверхности электродов радиусов  $R_s$  ( $V_1 = V_2$ )

Классическое выражение емкости цилиндрического конденсатора не учитывает толщину цилиндрических электродов, полагая ее бесконечно тонкой. Это справедливо в случае если длина электродов бесконечно велика по сравнению с радиусами цилиндров. Реальная картина поля иначе. Расчетные распределения заряда по поверхности цилиндрических электродов для датчика с размерами электродов  $R_1 = 1,6$  мм,  $R_2 = 2,6$  мм,  $R_3 = 5,95$  мм,  $R_4 = 7,0$  мм,  $R_5 = 8,9$  мм,  $R_6 = 9,95$  мм,  $l_1 = 299$  мм,  $l_2 = 204$  мм в воздухе ( $\varepsilon_1 = 1$ ), представлены на рисунке 11 и рисунке 12. Из кривых распределения заряда по поверхности электродов видно, что поле однородно, за исключением поля на торцах электродов. В случае, когда потенциал электрода 3 совпадает с потенциалом электрода 2 измеренная емкость датчика  $C_1 = 13,70$  пФ, рассчитанная численно  $C_1^{числ} = 13,80$  пФ, аналитически  $C_1^{ан} = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1 l_1 / \ln R_3/R_2 = 13,63$  пФ. В случае, когда потенциалы  $V_1 = V_2$ , характер поля изменяется и емкость возрастает. Измеренная емкость датчика  $C_2 = 69,62$  пФ, рассчитанная численно  $C_2^{числ} = 69,75$  пФ, рассчитанная аналитически  $C_2^{ан} = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1 l_2 / \ln R_5/R_4 = 69,24$  пФ. Ошибка расчета емкостей двухканального датчика численным методом не превосходит 1%. Несколько выше ошибка расчета емкостей с помощью классического аналитического выражения. Но и эта ошибка не превышает 1%. Этот факт говорит о том, что в случаях, когда межэлектродные зазоры датчика  $R_3 - R_2$ ,  $R_5 - R_4$  на порядок меньше

длин электродов  $l_1$  и  $l_2$ , с достаточно высокой степенью точности для решения прямых и обратных задач может быть использовано аналитическое выражение емкости цилиндрического конденсатора  $2\pi\epsilon_0\epsilon_1 l / \ln R_{s+1}/R_s$ .

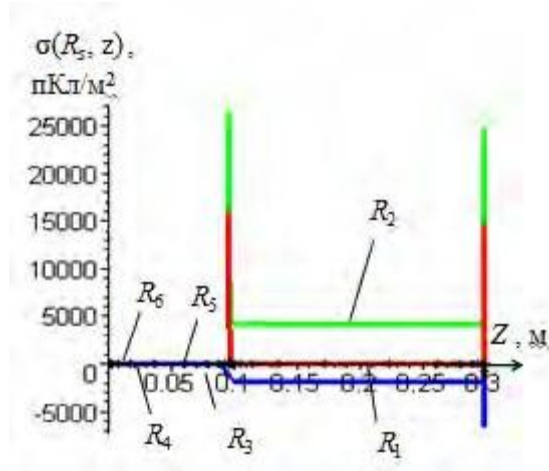


Рисунок 12 – Расчетная картина распределения зарядов по поверхности электродов радиусов  $R_s$  ( $V_3 = V_2$ )

На рисунке 13 представлена расчетная картина эквипотенциальных линий поля двухканального датчика ( $V_3 = V_2$ ). Как видно поле сконцентрировано в пределах межэлектродного зазора  $R_3 - R_2$  между первым и вторым цилиндрами по всей длине  $l_1$ . Об этом говорит и малое различие между расчетными и измеренными значениями емкостей датчика. ( $\delta C < 1\%$ ).

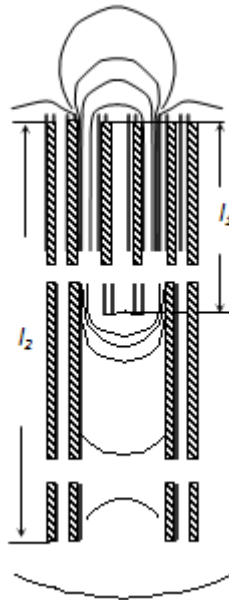


Рисунок 13 – Расчетная картина эквипотенциальных линий поля ( $V_3 = V_2$ )

Экспериментальные результаты взаимосвязи уровня жидкой среды и емкости датчика, представлены на рисунке 14. Прямая 1 отвечает дизельному топливу без добавок ( $\epsilon_2 = 2,13$ ), 2 – с добавками ( $\epsilon_2 = 2,15$ ), прямая 3 – соответствует рапсовому маслу ( $\epsilon_2 = 3,01$ ), прямая 4 – подсолнечному ( $\epsilon_2 = 3,03$ ). Зависимости на рисунке 14

подтверждают, что зависимость емкости датчика  $C_2$  от высоты уровня жидкости имеет линейный характер. Изменение потенциала на электроде 2 позволяет измерять две емкости датчика  $C_1$  и  $C_2$ . Емкость датчика  $C_1$  определяется глубиной погружения электродов в жидкость  $h - (l_2 - l_1)$ , емкости  $C_2$  определяется глубиной погружения –  $h$ .

Различие в глубинах погружения позволяет определять диэлектрическую проницаемость контролируемой жидкости через разность нормированных емкостей

$$\frac{C_1(h)}{C_1(0)}, \frac{C_2(h)}{C_2(0)} \text{ как : } \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{l_2 - l_1} \left( \frac{C_2(h)}{C_2(0)} l_2 - \frac{C_1(h)}{C_1(0)} l_1 \right), \quad (9)$$

$$\text{где } \frac{C_2(h)}{C_2(0)} = 1 - \frac{h}{l_2} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{h}{l_2}, \quad \frac{C_1(h)}{C_1(0)} = \frac{l_2 - h}{l_1} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{h - l_2 + l_1}{l_1} \quad \text{и определяются}$$

диэлектрической проницаемостью контролируемой жидкости, длиной электродов и высотой уровня  $h$ ;  $C_1(0)$  и  $C_2(0)$  – емкости в воздухе.

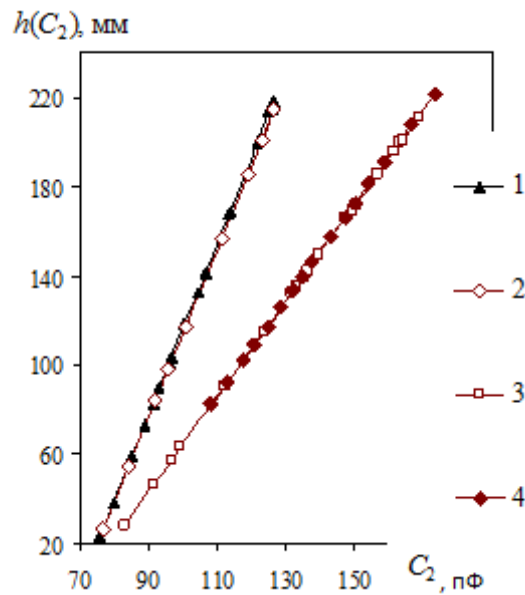


Рисунок 14 – Экспериментальная зависимость между высотой уровня жидкости  $h$  и емкостью датчика  $C_2$

В процессе измерения, пока уровень не опустится ниже  $l_2 - l_1$ , рассчитывается диэлектрическая проницаемость жидкости, а затем, исходя из измеренных значений  $C_1(h)$  и  $C_2(h)$ , вычисляется высота уровня жидкости для каждого значения потенциала на электроде 2:

$$h_{V_1=V_2} = \frac{C_2(h) - C_2(0)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \frac{C_2(0)}{l_2}, \quad (10)$$

$$h_{V_3=V_2} = \frac{C_1(h) - C_1(0)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \frac{C_1(0)}{l_1} + l_2 - l_1. \quad (11)$$

Высота уровня зависит только от одного неизменяемого параметра – диэлектрической проницаемости газообразной среды  $\varepsilon_1$ . Колебания  $\varepsilon_1$  незначительны и могут быть усредненным ( $\varepsilon_1 \approx 1,0006$ ).

Так как высота уровня жидкости описывается аналитическими выражениями (10) и (11), то рассмотренный датчик может выполнять калибровку самостоятельно, в независимости от диэлектрической проницаемости жидкости. Графики построенные согласно выражениям (10) и (11) ложатся на экспериментальные прямые представленные на рисунке 14. Для всех исследуемых жидкостей (дизельное топливо, подсолнечное и рапсовое масла) ошибка расчета уровня не превышала 1,5 мм. В зоне краевого эффекта, когда  $h = l_2 - l_1 = 95 \text{ мм}$  ошибка определения уровня составила 2,0 мм.

Рассмотренная конструкция двухпараметрового датчика уровня топлива имеет ряд преимуществ:

- двухканальный датчик содержит в себе два датчика с различной глубиной погружения электродов в жидкость  $h$  и  $h - (l_2 - l_1)$ ;
- датчик позволяет контролировать диэлектрические свойства жидких сред, а значит позволяет проводить оценку сортности топлива;
- датчик не требует калибровки, он осуществляет ее самостоятельно согласно аналитическим выражения (10), (11);
- он имеет такие же размеры как и однопараметровый датчик уровня топлива.

### Заключение

Развитие фундаментальных основ электроемкостных методов контроля привело к созданию новых научных направлений, таких как МЭМС, RFID технологии, нано- и биосенсорика, электроимпедансная томография, послужило дальнейшему развитию теории и созданию методик и алгоритмов моделирования электромагнитного поля электроемкостных преобразователей, построению адекватных математических моделей, эффективных алгоритмов анализа экспериментальных данных,

### Список литературы:

1. И.Г. Теория и применение накладных конденсаторов для неразрушающего контроля: автореф. дис. ... д-ра техн.наук: /И.Г. Матис. – Москва, 1976. - 46 с.
2. Матис, И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля / И. Г. Матис. - 2-е изд. – Рига: Зинатне, 1982. - 304с.
3. Sheppard, N. F., Day, D. R., Lee, H. L., Senturia, S. D. Microdielectrometry / N. F. Sheppard, D. R. Day, H. L. Lee, S. D. Senturia, // Sensors and Actuators. - July 1982. -V. 2. - P.263-274.
4. Zaretsky, M. C., Melcher, J. R., Cooke, C. M. Moisture sensing in transformer oil using thin-film microdielectrometry / M. C. Zaretsky. J. R. Melcher, C. M. Cooke // IEEE Transactions on Electrical Insulation, Dec. 1989. –V. 24. - P.1167-1176.
5. Скрипник, Ю.А. Контроль параметров технологических процессов в легкой промышленности / Ю.А. Скрипник, В.А. Дубровский, Б.А. Танюк. – Киев: Техника, 1980. – 240 с.
6. Заграй, Я.М. Кондуктометрический метод контроля технологических растворов и сред / Я.М. Заграй [и др.] // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. -1990. - № 4. -С. 102–107.
7. Способ измерения влажности: а. с. 1165967 СССР, МКИ G 01 N 27/22 / В.С. Ройфе, К.Д. Тухарелли; Научно-исследовательский институт строительной физики. - № 3646937/24 – 25; заявл. 29.09.83; опубл. 07.07.85 // Открытия. Изобрет. - 1985.- № 25. - С. 152.
8. Горбов, М. М. Исследования электроемкостных первичных измерительных преобразователей поперечных размеров протяженных цилиндрических изделий: дис. ... д-ра техн. наук: / М. М.Горбов. - Барнаул, 1980. - 402 л.
9. Струнский, М.Г. Бесконтактные емкостные микромеры / М.Г. Струнский, М. М. Горбов. - Ленинград, 1986 . –134 с.
10. Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y. Q., Zahn, M. Interdigital Sensors and Transducers / A. V. Mamishev [идр.]// Proceedings of the IEEE, May 2004. - V.92, №5. -P. 808-845.

11. Sheppard, N. F., Day, D. R., Lee, H. L., Senturia, S. D. Microdielectrometry / N. F. Shepard, D. R. Day, H. L. Lee, S. D. Senturia, // Sensors and Actuators. - July 1982. -V. 2. - P.263-274.
12. Kranbuehl, D. E., Delos, S. E., Yi, E..Measurement and application of dielectric properties / D. E. Kranbuehl, S. E. Delos, E. Yi. // SPIE Technical Papers. - 1985. - V. 31(311). -P. 73-90.
13. Zaretsky, M. C., Melcher, J. R. Complex permittivity measurements of thin films using microdielectrometry / M. C. Zaretskyand, J. R. Melcher // Conference on Electrical Insulation and Di-electric Phenomena. (Claymont, DE), Nov. 1986. -P.462-471.
14. Guggenberg, P. A., Zarersky, M. C. Estimation of one-dimensional com-plex-permittivity profiles: a feasibility study / P. A. von Guggenberg, M. C. Za-rersky // Journal of Electrostatics. - Mar. 1995. - V.34. -P.263-277.
15. Zaretsky, M. C., Melcher, J. R., Cooke, C. M. Moisture sensing in trans-former oil using thin-film microdielectrometry / M. C. Zaretsky. J. R. Melcher, C. M. Cooke // IEEE Transactions on Electrical Insulation, Dec. 1989. -V. 24. - P.1167-1176.
16. Zaretsky, M. C., Li, P., Melcher, J. R. Estimation of thickness, complex bulk permittivity and surface conductivity using interdigital dielectrometry / M. C. Zaretsky, P. Li. and J. R. Melcher // IEEE Transactions on Electrical Insulation. - Dec. 1989. - V.24. - P.1159-1166.
17. Starzyk, F. Interdigit dielectrometry of water vapour induced changes in granular starch / F. Starzyk // Journal of Archives of Materials Science and Engineering. - Jan. 2008. - V. 29. - P.30-35.
18. Скрипник, Ю.А.Повышение точности измерительных устройств/ Ю.А. Скрипник. – Кев: Техника, 1976. – 264 с.
19. Kolesar, E. S. and Wiseman, J. M. Interdigitated gate electrode held effect transistor for the selective detection of nitrogen dioxide and diisopropyl methylphosphonate/ E. S. Kolesar and J. M. Wiseman //Analytical Chemistr.- 1989. - V. 61. - P.2355-2361.
20. Gardner, Л. W. Intelligent gas sensing using an integrated sensor pair / Л. W. Gardner //Sensors and Actuators B. -1995. – V.26-27. - P. 261-266.
21. Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y. Q., Zahn, M. Interdigital Sensors and Transducers / A. V. Mamishev [идр.]// Proceedings of the IEEE, May 2004. - V.92, №5. -P. 808-845.
22. Sheiretov, Y. K. and Zahn, M. Dielectrometry measurements of moisture dynamics in oil-impregnated pressboard /Y. K. Sheiretov and M. Zahn // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. -June 1995. -V.2. - P. 329-351.
23. Sheiretov, Y. K., Zahn, M. Dielectrometry measurements of spatial moisture profiles in oil-impregnated pressboard / Y. K. Sheiretov and M. Zahn // IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. (University of Queensland. Brisbane. Australia), July 1994. -P.701-704.
24. Курбатов, В.М. Емкостьконденсаторасэлектродамигребенчатойформы / В.М. Курбатов, Ю.П. Пресняков // Электричество. - 1975. - № 6. -С. 84–86.
25. Емкостной датчик для измерения физико-химических свойств рыхлых и сыпучих веществ: а. с. 1182370 СССР, МКИ G 01 N 27/22 / В.В. Анохин, Н.М. Свиридов, В.А. Ефремов, А.М. Свиридов, В.Н. Гладкий, Е.С. Торосян, Т.В. Белая; Киевский технологический институт легкой промышленности. - № 3724621/24 – 25; заявл. 11.04.84; опубл. 30.09.85 // Открытия. Изобрет. - 1985.- № 36. -С. 163
26. Способ измерения влажности: а. с. 1165967 СССР, МКИ G 01 N 27/22 / В.С. Ройфе, К.Д. Тухарелли; Научно-исследовательский институт строительной физики. - № 3646937/24 – 25; заявл. 29.09.83; опубл. 07.07.85 // Открытия. Изобрет. - 1985.- № 25. - С. 152.
27. Емкостная накладная ячейка для измерения диэлектрических характеристик материала: а. с. 1226348 СССР, МКИ G 01 R 27/26 / В.И. Зотов, И.Г. Матис, Х.Э. Слава Х.Э, А.В. Круминьш; Специальное конструкторское бюро научного приборостроения с опытным производством Института механики полимеров АН ЛатвСССР и Институт механики полимеров АН ЛатвСССР. - № 3803899/24 – 21; заявл. 17.10.84; опубл. 23.04.86 // Открытия. Изобрет. - 1986.- № 15. - С. 174.

28. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергия, 1973. -328 с.
29. Любутин, О.С. Устройство для автоматического контроля и регулировки распределения стеклонитей в стеклопластике / О.С. Любутин [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. -1966.- № 6. -С. 681–683
30. Арш, Э.И. Высокочастотный автогенераторный контроль в горном деле / Э.И. Арш. – М.: Недра, 1974. -190 с.
31. Потапов, А.И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов / А.И. Потапов, Ф.П. Пеккер. – Л.: Машиностроение, 1974. -190 с.
32. Washabaugh, A., Sheiretov, Y., Schlicker, D. E., Goldfine, N. J. NonContact Capacitive Sensing Dielectrometers for Characterization of Adhesives and Epoxies // ASNT Fall Conf., Indianapolis, IN, USA, 2000. -P.155-157.
33. Богданова, Г.С. Зависимость диэлектрических потерь  $\beta$ -сподулиновых ситалов от их состава и режима термообработки / Г.С. Богданова [и др.] // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. -1973. -Т. 9. -С. 2047–2050.
34. Курбатов, В.М. Емкостной преобразователь для измерения толщины тонких диэлектрических слоев / В.М. Курбатов, Ю.П. Пресняков // Измерительная техника. - 1974. -№ 11. -С. 69–70.
35. Грохольский, А.Л. Емкостные первичные измерительные преобразователи диаметра неизолированного микропровода / А.Л. Грохольский [и др.] // Измерение, контроль, автоматизация. - М., 1978. - Т. 2. -С. 16–23.
36. Горбова, Г.М. Приборы контроля линейных микроперемещений на основе бесконтактных электроемкостных трехэлектродных первичных измерительных преобразователей: дисс. ... д-ра техн наук: 05.11.13/ Г.М. Горбова. - Барнаул, 2003. – 289л.
37. Способ измерения шероховатости и неровности поверхности: а.с. 1019232 СССР, МКИ G 01 B 7/34 / Е.А. Хагемейстер, А.Е. Мишин; Кировский политехнический институт и Ленинградский государственный ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени университет им. А.А.Жданова. -№ 2923124/25 – 28; заявл. 07.04.80; опубл. 23.05.83 // Открытия. Изобрет. - 1983.- № 19. -С. 117.
38. Цейтлин, Я.М. Синтез высокоточных систем измерения геометрических величин в машиностроении при воздействии денормализующих факторов: автореф. дисс. ... д-ра техн наук: 05.11.01/ Я.М. Цейтлин; НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. - Л., 1990.- 50 с.
39. Craig, D. Q. M. Dielectric Analysis of Pharmaceutical Systems. Taylor &Francis Group. 1995. P 232.
40. Li, X. Instrumentation and Inverse Problem Solving tor Impedance Imaging Ph.D. Department of Electrical Engineering University of Washington Graduate School, 20060146.
41. Robert B. McIntosh and Mark E. Casada. Fringing field capacitance sensors for measuring the moisture content of agricultural commodities // IEEE Sensors Journa.-March, 2006. - V.8, № 3. - P.240-247.
42. Johnson, P. M., Thiel, D.V., James, D. A. Contributions to the Measured Capacitance by the Dielectric Properties of Water in Insulated Electrode Soil/ P. M. Johnson, D. V. Thiel, D. A.James// Moisture Sensors,Sensors Proceedings of IEEE. – 2002. - V.1. - P. 495-498.
43. Saxena, A. V. et al. Design and fabrication of a MEMS capacitive chemical sensor system//IEEEWorkshoponMicroelectronicsandElectronDevices. 14 April. 2006. -P. 17 - 19.
44. Sentnria, S. D. The future of microsensor and microactuator design / S. D. Sentnria// Sensors and Actuators A. - Mar. 1996. - V. 56. - P. 151-166.
45. Вавилов, В.Д., Вавилов, И.В., Долгов, А.Н. Робастное управление микросистемным гироскопом/ В.Д.Вавилов, И.В.Вавилов, А.Н. Долгов //Датчики и системы. – 2009. – № 11. - С. 17 – 19.
46. A T. J. Plum, V. Saxena and J.R. Jessing. Design of a MEMS Capacitive Chemical Sensor Based on Polymer Swelling // submitted to IEEE WMED2006.
47. Beving, H., Eriksson, G. Dielectric-Spectroscopy of Human Blood / H. Beving, G. Eriksson // European Journal of Surgery. - 1994. – P. 87-89.



48. Sensor for chemical and biological materials: pat. USA N 6730212 B1/Frederick G. Yamagishi, Thomas B. Stanford, Jr., Camille I. Van Ast;Hrl Laboratories, LLC.- USA 9/679,428: 03.10. 2000.
49. Sekiguchi N. et al. Microsensor for the measurement of water content in the human skin //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2001. – Т. 78. – №. 1. – С. 326-330.
50. Mukhopadhyay S. C., Gooneratne C. P. Comparison of electromagnetic response of planar interdigital sensors: Quality testing of pork meat //null. – IEEE, 2006. – С. 365-370.
51. Syaifudin A. R. M., Jayasundera K. P., Mukhopadhyay S. C. A low cost novel sensing system for detection of dangerous marine biotoxins in seafood //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2009. – Т. 137. – №. 1. – С. 67-75.
52. Sears J. Interdigital dielectrometry based detection and identification of dangerous materials for security applications :дис. – Massachusetts Institute of Technology, 2003
53. Штыков, С.Н., Русанова, Т.Ю. Наноматериалы и нанотехнологии в химических и биохимических сенсорах: возможности и области применения/ С.Н. Штыков, Т.Ю. Русанова // Рос.хим. ж. Ж. Рос. хим. Об-ва им. Д.И. Менделеева.- 2008. - Т. LII, №2. - С. 93-100.
54. Васильев И. Р. Емкостные устройства измерения детонационной стойкости углеводородных топлив: автореф. дисс. ... к.т. н.: 05.13.05/ И. Р. Васильев; СГАУ. - Самара, 2007.- 20 с.
55. Мастепаненко М. А. Информационно- измерительная система непрерывного контроля уровня топлива в емкостях. Дисс: ... к.т. н.: 05.11.16/ М. А. Мастепаненко; СГАУ. - Ставрополь, 2014.- 229 с.
56. Li, X. B., Larson, S. D., Zyuzin, A. S., Mamishev, A. V. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors / X. B. Li [идр.] //Sensors Journal, IEEE. – 2006. - V.6, № 2. - P.434-440.
57. Иоссель, Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Качанов, М.Г. Струнский. Л.: Энергия, 1960. -240 с.
58. Zaretsky, M. C., Mouayad, L., Melcher, J. R. Continuum properties from interdigital electrode dielectrometry / M. C. Zaretsky, L. Mouayad, J. R. Melcher // IEEE Transactions on Electrical Insulation. - Dec. 1988. - V.23. - P. 897-917.
59. Khan, S. H., Abdullah, F. Finite-Element Modeling of Multielectrode Capacitive Systems for Flow Imaging / S. H. Khan, F. Abdullah //EE Proceedings-G Circuits Devices and Systems. - 1993. - V.140, № 3. - P. 216-222.
60. Тарчуткин, А. Л. Использование метода интегральных уравнений для снижения размерности конечно-элементной задачи электростатического поля/ А. Л. Тарчуткин, М. В. Остренко //Электротехника та електроенергетика. – 2009 . – №2. – С.61- 64.
61. Dzhezhora A.A. The Edge Effect on the Electrode Faces upon Testing of Orthotropic Media/ A.A. Dzhezhora A.M. Naumenko//Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, Vol.50, №3, pp. 50-56.
62. Джежора А.А. Моделирование и методы электроемкостного контроля ортотропных сред на основе применения зеркально-симметричных преобразователей: автореф. дисс. ... д-ра техн наук: 05.11.13/ А.А. Джежора; ИПФ НАН Беларуси. - М., 2013.- 44 с.
63. Styra D. et al. Non-destructive Methods For Composite Materials Anisotropy Evaluation //Journal of Nondestructive Testing. – 2005. – Т. 10. – №. 12.
64. Джежора А.А. Датчик контроля нефтепродуктов. Джежора А.А., Чернов Е.А., Свистунов Б.Л., Царенко Ю.В. // 9-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2016» - Минск, 2016. – С.174-175
65. Джежора А.А. Контроль качества нетканых материалов/ Джежора А.А., Рубаник В.В.// 9-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2016» - Минск, 2016. – С.172-173.
66. Джежора А.А. Электроемкостной метод контроля и диагностики качества материалов текстильной промышленности/ А.М. Наумко, А.А. Джежора, Е.С. Деменьтева // Инновации в текстильной промышленности:– Витебск, 2016. - Гл.9. – С.158-175.