

621.3  
Д 40

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ»



УДК 621.3.08

**ДЖЕЖОРА**  
Александр Александрович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО КОНТРОЛЯ  
АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНО-  
СИММЕТРИЧНЫХ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

Минск, 2013

Работа выполнена в ГНУ «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси» и УО «Витебский государственный технологический университет»

Научный консультант

**Рубаник Василий Васильевич**, д-р техн. наук, директор ГНУ «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси», г. Витебск

Официальные оппоненты:

**Баев Алексей Романович**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ГНУ «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

**Жагора Николай Адамович**, д-р техн. наук, профессор, директор Белорусского государственного института метрологии, г. Минск

**Шушкевич Геннадий Чеславович**, д-р физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и компьютерного моделирования УО «Гродненский государственный университет», г. Гродно

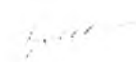
Оппонирующая организация: **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**

Защита состоится «17» декабря 2013г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.16.01 при ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» по адресу: 220072, Минск, ул. Академическая, 16, тел. ученого секретаря +375 0 17 284-24-38, E-mail: alekspk@iapb.bas-net.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » ноября 2013г.

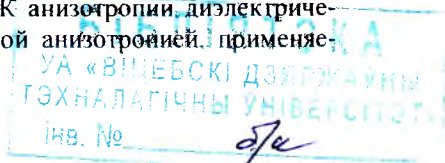
Ученый секретарь совета по защите диссертаций,  
доктор технических наук

  
А.П. Крень

## ВВЕДЕНИЕ

Накладные измерительные конденсаторы (НИК), известные как fringing electric field (FEF) sensors, широко используются в неразрушающем контроле (НК) физико-механических свойств материалов, изучении механизмов и кинетики химических реакций, фазовых переходов, контроле геометрических размеров изделий, диагностике состояния объектов, исследовании электрофизических параметров как диэлектрических, так и проводящих сред. В свою очередь, применение электроемкостных методов НК требует создания электроемкостных преобразователей (ЭП), обеспечивающих локализацию электрического поля на заданном участке контролируемого изделия, исключения краевых эффектов на торцах электродов, решения прямой и обратной задач НК. Недостаточное теоретическое исследование физических явлений при электромагнитном контроле значительно ограничивает возможности использования рассматриваемого метода в отношении точности и информативности измерений при НК материалов, оказывает негативное влияние на качество проектирования средств электроемкостного контроля. Трудность анализа физических явлений, обработки сигналов объясняются сложностью и разнообразием физических свойств, геометрии форм исследуемых объектов, нелинейностью физических явлений и свойств окружающей среды, учетом элементной базы самих ЭП. Численные методы расчета ЭП развиваются, начиная с середины 80-х годов прошлого века. В настоящее время разработан и используется целый ряд коммерческих программ анализа и оптимизации электродинамических систем (ANSYS Maxwell, ELCUT, CST Microwave Studio, SPEAG SEMCAD и др.). Среди численных методов, применяемых для расчета электроемкостных датчиков, наиболее часто применяется Finite Element Method - FEM (пакеты Ansoft Maxwell 2D и 3D), позволяющий рассчитывать электромагнитные поля и параметры сложных электродинамических систем. Обладая мощным вычислительным ресурсом, Ansoft Maxwell 2D и 3 D позволяет проводить расчеты для моделей любой сложности, однако он требователен к вычислительным ресурсам и требует значительного временного интервала.

Настоящая работа посвящена развитию физических основ электроемкостного метода НК и направлена на развитие теории и создание новых методик и алгоритмов моделирования электромагнитного поля низкой частоты в кусочно – однородных анизотропных слоистых средах методом интегральных уравнений, принципов создания и проектирования новых типов электроемкостных преобразователей, расширению их функциональных возможностей, разработке методик НК анизотропии диэлектрических свойств ортотропных материалов и созданию универсальных аналитических и численных математических моделей ЭП. В работе впервые обоснованы и реализованы методики НК анизотропии диэлектрических свойств материалов, обладающих слабой анизотропией, применяе-



мых в народном хозяйстве. Решение поставленных задач в НК направлено на повышение качества и конкурентоспособности отечественной продукции, снижение ее материалоемкости и получение существенного экономического эффекта.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Научные исследования по теме диссертации проводились в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедр «Физика», «Теоретическая и прикладная математика» учреждения образования «Витебский государственный технологический университет», лаборатории физики металлов государственного научного учреждения «Институт технической акустики НАН Беларуси» и государственными научными заданиями «Исследование анизотропии физико-механических свойств ортотропных полимерных материалов, применяемых в легкой промышленности методами электроемкостного неразрушающего контроля» ГПФОИ «Диагностика» № гос. рег. 2002984, 2002-2005гг.; «Разработка электроемкостных методов неразрушающего контроля полимерных материалов» задание ГКПНИ «Техническая диагностика-36» № гос. рег. 20062708, 2006-2010 гг.; «Разработка диэлькометрического метода и средств контроля состава и структуры полимерных материалов» ГПНИ 5. 4.24 Механика, техническая диагностика, металлургия, № 20113535, 2011-2013 гг., а также при выполнении ХД №424 «Разработка новой технологии получения пряжи с использованием короткого льняного волокна», №424/329, ГР 20092399 от 03.09.2011 с РУПП «Оршанский льнокомбинат»; задания региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области» 02.06 «Разработать и освоить производство датчика объема топлива ёмкостного типа» (исп. ИТА НАН Беларуси, ВЗЭП), 4 кв.2012г. -4 кв.2016г., «Научно-технический анализ и разработка предложений по созданию системы входного контроля полимерных материалов, используемых в производстве ЗАО «МП Симург», в рамках х/д ГНУ «ИТА НАН Беларуси» и ЗАО «МП Симург».

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является развитие физических основ и создание высокоэффективных методов и средств электроемкостного контроля анизотропных материалов на основе зеркально-симметричных схем преобразователей, обладающих повышенными точностными характеристиками и расширяющих технические возможности НК.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать физические основы создания высокоэффективных методов и средств контроля материалов со слабой анизотропией физико-механических свойств на основе зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов, экранированных накладных измерительных конденсаторов, обладающих повышенными точностными характеристиками и расширяющих технические возможности НК;

- разработать теоретически и экспериментально обосновать методику численного 2D и 3D моделирования стационарных электростатических полей в задачах электроемкостного контроля, базирующуюся на представлении источников заряда в виде двух эквипотенциальных зеркально-симметричных составных частей, разнесенных на расстояние, равное толщине каждого из источников заряда;

- разработать алгоритмы решения прямых и обратных задач расчета электрических полей в кусочно-однородных анизотропных средах с плюскопараллельными границами;

- разработать методику определения и устранения методической погрешности измерения анизотропии диэлектрических свойств, вызванной искажением поля ленточных электродов на торцах;

- разработать высокоэффективные методики и средства неразрушающего контроля анизотропии физико-механических свойств объектов контроля, их состава, структуры, а также двухпараметровые средства контроля уровня жидких и сыпучих сред;

- разработать методики и алгоритмы определения основных характеристик электроемкостных преобразователей (рабочих и паразитных емкостей, глубины и ширины зон контроля, функций преобразования, частных производных по входным параметрам);

- провести экспериментальные исследования и апробирование разработанных алгоритмов в задачах неразрушающего контроля.

Для верификации алгоритмов и программ используются данные экспериментов, выполненных автором лично, исследователями лаборатории Electrical Engineering and Computer Science Массачусетского технологического института, а также результаты аналитических, численных расчетов, выполненных программой анализа и оптимизации электродинамических систем ANSOFT Maxwell.

## **Объект и предмет исследования**

**Объектом исследования** являются электроемкостные преобразователи, методики и средства неразрушающего контроля.

**Предметом исследования** являются электроемкостные преобразователи, позволяющие получать полную и достоверную информацию о свойствах контролируемых анизотропных объектов; методики получения

мых в народном хозяйстве. Решение поставленных задач в НК направлено на повышение качества и конкурентоспособности отечественной продукции, снижение ее материалоемкости и получение существенного экономического эффекта.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Научные исследования по теме диссертации проводились в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедр «Физика», «Теоретическая и прикладная математика» учреждения образования «Витебский государственный технологический университет», лаборатории физики металлов государственного научного учреждения «Институт технической акустики НАН Беларуси» и государственными научными заданиями «Исследование анизотропии физико-механических свойств ортотропных полимерных материалов, применяемых в легкой промышленности методами электроемкостного неразрушающего контроля» ГПФОИ «Диагностика» № гос. рег. 2002984, 2002-2005гг.; «Разработка электроемкостных методов неразрушающего контроля полимерных материалов» задание ГКПНИ «Техническая диагностика-36» № гос. рег. 20062708, 2006-2010 гг.; «Разработка диэлькометрического метода и средств контроля состава и структуры полимерных материалов» ГПНИ 5. 4.24 Механика, техническая диагностика, металлургия, № 20113535, 2011-2013 гг., а также при выполнении ХД №424 «Разработка новой технологии получения пряжи с использованием короткого льняного волокна», №424/329, ГР 20092399 от 03.09.2011 с РУПТП «Оршанский льнокомбинат»; задания региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области» 02.06 «Разработать и освоить производство датчика объема топлива ёмкостного типа» (исп. ИТА НАН Беларуси, ВЗЭП), 4 кв.2012г. -4 кв.2016г., «Научно-технический анализ и разработка предложений по созданию системы входного контроля полимерных материалов, используемых в производстве ЗАО «МП Симург», в рамках х/д ГНУ «ИТА НАН Беларуси» и ЗАО «МП Симург».

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является развитие физических основ и создание высокоэффективных методов и средств электроемкостного контроля анизотропных материалов на основе зеркально-симметричных схем преобразователей, обладающих повышенными точностными характеристиками и расширяющих технические возможности НК.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать физические основы создания высокоэффективных методов и средств контроля материалов со слабой анизотропией физико-механических свойств на основе зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов, экранированных накладных измерительных конденсаторов, обладающих повышенными точностными характеристиками и расширяющих технические возможности НК;

- разработать теоретически и экспериментально обосновать методику численного 2D и 3D моделирования стационарных электростатических полей в задачах электроемкостного контроля, базирующуюся на представлении источников заряда в виде двух эквипотенциальных зеркально-симметричных составных частей, разнесенных на расстояние, равное толщине каждого из источников заряда;

- разработать алгоритмы решения прямых и обратных задач расчета электрических полей в кусочно-однородных анизотропных средах с плоскопараллельными границами;

- разработать методику определения и устранения методической погрешности измерения анизотропии диэлектрических свойств, вызванной искажением поля ленточных электродов на торцах;

- разработать высокоэффективные методики и средства неразрушающего контроля анизотропии физико-механических свойств объектов контроля, их состава, структуры, а также двухпараметровые средства контроля уровня жидких и сыпучих сред;

- разработать методики и алгоритмы определения основных характеристик электроемкостных преобразователей (рабочих и паразитных емкостей, глубины и ширины зон контроля, функций преобразования, частных производных по входным параметрам);

- провести экспериментальные исследования и апробирование разработанных алгоритмов в задачах неразрушающего контроля.

Для верификации алгоритмов и программ используются данные экспериментов, выполненных автором лично, исследователями лаборатории Electrical Engineering and Computer Science Массачусетского технологического института, а также результаты аналитических, численных расчетов, выполненных программой анализа и оптимизации электродинамических систем ANSOFT Maxwell.

## **Объект и предмет исследования**

**Объектом исследования** являются электроемкостные преобразователи, методики и средства неразрушающего контроля.

**Предметом исследования** являются электроемкостные преобразователи, позволяющие получать полную и достоверную информацию о свойствах контролируемых анизотропных объектов; методики получения

и обработки экспериментальных данных; эффекты, происходящие в преобразователях под воздействием окружающей среды и обуславливающие чувствительность и помехоустойчивость измерений; математические модели, аналитические и численные методы расчета электрических полей ЭП, а также методы неразрушающего контроля свойств анизотропных слоистых материалов и уровня жидких и сыпучих сред. Все задачи диссертационных исследований решены на основе апробированных и корректных аналитических и численных методов расчета и интерпретации экспериментальных данных.

Идея настоящей работы заключается в том, что на основе предложенных зеркально-симметричных схем ЭП в сочетании с методами математического моделирования создана и нашла применение теория функционирования конденсаторов различных конструкций, позволяющая существенно расширить технические возможности ЭП, увеличить в 2 раза их чувствительность и информативность измерений в процессе контроля слоистых и анизотропных материалов.

Достоверность результатов подтверждается корректностью поставленных задач, достоверностью исходных и экспериментальных данных, использованием общепринятых теорий, гипотез и допущений, применением апробированных методик неразрушающего контроля, методов математического моделирования, решением поставленных задач и совпадением результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Новые методики численных расчетов электрических полей, отличающиеся от традиционно используемых методов тем, что они основаны на представлении замкнутых эквипотенциальных поверхностей электродов разомкнутыми, зеркальными друг относительно друга парами заряженных тонких поверхностей, разнесенными в пространстве на расстояние, равное толщине электродов, и имеющие тот же потенциал, что и исходные соответствующие им электроды, позволившие существенно упростить алгоритмы расчета, снизить требования к вычислительным ресурсам, снизить в разы время расчета без снижения точности, на основе которых были разработаны преобразователи с расширенными функциональными свойствами - ЗСНИК, ЭНИК.

2. Универсальные численные и аналитические модели ЗСНИК, ЭНИК, включающие в себя модели широко применяемых НИК.

3. Новые методики неразрушающего контроля анизотропии диэлектрических свойств материалов, обладающих слабой анизотропией, с использованием ЭНИК и ЗСНИК, позволяющие повысить чувствительность и точность измерения анизотропии диэлектрических свойств в 1,5-2



раза по сравнению с методиками измерения анизотропии диэлектрических свойств, основанными на использовании традиционных НИК.

4. Методики диэлькометрического неразрушающего контроля состава и структуры материалов, обладающих слабой анизотропией, посредством ЭНИК и ЗСНИК, позволяющие устранить погрешности за счет краевого эффекта на торцах электродов, влияния окружающей среды (колебаний влажности, температуры, давления), погрешностей, вызванных различной ориентацией осей анизотропии материала при помещении его в ЭП, за счет колебаний плотности контролируемого материала, кумулятивного эффекта.

5. Методика оценки вклада краевых эффектов на торцах электродов в емкость, основанная на использовании двух идентичных датчиков с различной длиной электродов  $L_1$  и  $L_2$ , позволяющая значительно упростить определение вклада краевого эффекта на торцах электродов в емкость ЭП различных конструкций, а также верификацию численных расчетов ЭП.

6. Методика определения глубины зоны контроля электроемкостных преобразователей, основанная на зеркальном совмещении контуров электродов двух НИК и последующем измерении емкостей конденсаторов, позволившая повысить точность определения глубины зоны контроля в два раза.

7. Двухпараметровые средства контроля уровня жидких и сыпучих сред, осуществляющие постоянную само калибровку для компенсации влияния внешних воздействий окружающей среды, цилиндрический датчик контроля уровня жидких и сыпучих сред, которые улучшают эксплуатационные характеристики датчиков, повышают надежность и достоверность измерений в динамических условиях движения жидкости.

8. Пакет программ для численных расчетов электрических полей широкого класса электроемкостных преобразователей, позволяющий проводить расчеты и оптимизацию ЭП, решать задачи с учетом реальной толщины и конфигурации электродов.

### **Личный вклад соискателя**

Изложенные в диссертации результаты получены автором лично, при его непосредственном участии или под его научным руководством.

Теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. Автору принадлежит постановка проблемы в целом и задач экспериментальных исследований; разработка основных методик проведения экспериментов и обработка результатов; научное руководство и непосредственное участие в экспериментах, включая обработку результатов и их интерпретацию; разработка численных и аналитических методов рас-

чета; написание статей, тезисов докладов, отчетов и описаний к авторским свидетельствам и патентам. Совместными с соавторами являются результаты, полученные при выполнении госбюджетных заданий и проектов, хоздоговорных НИР, работ по договорам о научно - техническом сотрудничестве, где автор являлся ответственным исполнителем или научным руководителем. Большая часть работ выполнена в соавторстве с научным консультангом доктором технических наук Рубаником В.В., который осуществлял общее стратегическое руководство всей тематикой, связанной с электроемкостным методом контроля. В монографии [2 – А] автором написана глава 18. Публикации [1 – А, 6 – А, 7 – А, 8 – А, 12 – А, 15 – А, 16 – А, 25 – А, 31 – А, 37 – А, 45 – А, 51 – А, 53 – А, 77 – А, 78 – А, 79 – А] подготовлены к печати без соавторов.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты работы доложены и обсуждены на I Всесоюзном и республиканском совещании-семинаре «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления»- «Датчик - 1987» (Гурзуф, 1987г.), VIII Всесоюзной научно-технической конференции «Измерительные информационные системы» (Ташкент, 1987г.), XII Всесоюзной научно-технической конференции «Надежность. экономичность и качество текстильных материалов» (Киев, 1989г.), Всесоюзной научно-технической конференции «Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля» (Могилев 1989г.), Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 2000г.), 40 Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» (Великий Новгород, 2002 г.), XV Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (Тольятти, 2003 г.), XIV, XVI «Петербургских чтениях по проблемам прочности» (Санкт – Петербург, 2003г. и 2006г.), Международной конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, 2004г. и 2006г.), XV, XVI Научно-технических конференциях «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» - (Судак, 2003, 2004г.), I Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники: научные исследования, подготовка кадров» (Минск, 2005 г.), XIII, XIV, XV, XVI, XVII Международных конференциях «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (Ялта, 2005-2009г.), IV Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 2006г.), Международных научно-практических конференциях «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, 2006 и 2009г.), Международной конференции «Полимерные композиты и трибология» «Политкомтриб-

2007» (Гомель, 2007г.), IX-й Международной научно-практической конференции «Контроль, стандартизация, контроль: теория и практика» (Ялта, 2009г.), международной Конференции Физиков Молдовы «КФМ-2009» (Кишинев, 2009г.), Международной научно-технической конференции «Автоматизация технологических процессов» (Минск, 2011г.), II Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (Минск, 2013г.).

### Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований опубликовано 84 печатные работы, в том числе 2 монографии (17,92 авторских листа), 21 статья в рецензируемых научных журналах (6,37 авторских листа), 40 работ в сборниках статей и материалов конференций (4,01 авторских листа), 6 тезисов докладов (0,36 авторских листа). Новизна и оригинальность технических решений защищена 6 авторскими свидетельствами на изобретения и 6 патентами Республики Беларусь.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 28,66 авторских листа.

### Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и Приложений.

Общий объем работы составляет 291 страниц, в том числе 135 рисунка, 6 таблиц, 4 приложения на 44 страницах и список из 311 используемых литературных источников на 26 страницах (в том числе 84 авторских на 9 страницах).

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* показана актуальность проблемы, определены цели, сформулированы задачи и методы исследования.

*В первой главе* рассмотрено состояние отечественных и зарубежных исследований в области теории и практики применения методов и средств электроемкостного неразрушающего контроля [1 – А, 6 – А, 10 – А, 45 – А, 73 – А, 74 – А, 76 – А] объектов с анизотропной и слоистой структурой [18 – А, 19 – А, 44 – А, 45 – А, 75 – А, 78 – А]. Проведен анализ применения многосекционных накладных измерительных конденсаторов для контроля анизотропии диэлектрических свойств. Показано - существующие методики не позволяют получать достоверные результаты об анизотропии диэлектрических свойств. Это вызвано краевыми эффектами

на концах электродов [66 – А], где поле не является плоскопараллельным, соизмеримостью неоднородностей структуры с толщиной материалов и размеров преобразователя. Приводится классификация электроемкостных преобразователей по назначению, конструктивным особенностям, способам разделения входных параметров, характеру их подключения.

Обоснована актуальность темы диссертации. Сформулирован предмет, круг вопросов и задач, для решения которых проводили теоретические и экспериментальные исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке методологии и математического аппарата для расчета плоскопараллельных полей в слоистых анизотропных средах, верификации теоретических положений, алгоритмов и программ, исследованию вклада полей пятточной части электродов в общую картину поля, созданию обобщенных математических моделей электроемкостных преобразователей.

При решении сложных задач расчета электромагнитных полей в анизотропных слоистых средах к численным методам предъявляется ряд требований: снижение вычислительных затрат по времени, по памяти, вычисление основных характеристик ЭП с относительной погрешностью не более 3%.

Среди численных методов, применяемых для расчета электромагнитных полей, следует выделить метод конечных разностей, метод конечного элемента, известный как finite element method (FEM). Наиболее часто применяется пакет Ansoft Maxwell 2D, позволяющий рассчитывать электромагнитные поля и параметры сложных электродинамических систем, однако, он требователен к вычислительным ресурсам, занимает значительное время расчета. По этой причине для расчета плоскопараллельных полей предложен и научно обоснован метод зеркально-симметричных схем [12 – А, 13 – А, 14 – А, 16 – А, 56 – А, 65 – А].

Суть метода состоит в замене замкнутых эквипотенциальных поверхностей источников поля разомкнутыми, зеркальными друг относительно друга парами заряженных тонких поверхностей, разнесенными в пространстве на расстояние, равное толщине электродов и имеющих тот же потенциал, что и исходные соответствующие им источники поля (рисунк 1).

Для новой геометрии источников поля задачу решали методом интегральных уравнений относительно искомой функции плотности зарядов на зеркальных поверхностях с учетом значений потенциалов на них. Зеркальная друг относительно друга пара заряженных поверхностей разнесена в пространстве на расстояние, равное толщине источников поля  $d$  (электродов). Эта зеркальная пара заряженных поверхностей имитирует поле на краях электродов и упрощает задачу расчета.

Такой подход при расчете электрических полей позволил имитировать поле в воздушных карманах, образованных реальными электродами, повысить точность расчета параметров поля за счет учета толщины и рельефа поверхности электродов, вычислять составляющие межэлектродной емкости, обусловленные потоками силовых линий между электродами со сторон, обращенных к контролируемому образцу и подложке, значительно снизить вычислительные затраты.



Рисунок 1– Вид сечения НИК

В качестве исходного выражения при составлении системы интегральных уравнений для потенциалов точек поверхности электродов использовали выражение логарифмического потенциала:

$$V = \frac{\Gamma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{1}{r_{MN}} \sigma l, \quad (1)$$

где  $\sigma$  - плотность заряда на отрезке  $l$  в сечении электрода,  $r_{MN}$  - расстояние между рассматриваемой точкой  $M$  и переменной точкой  $N$  (зарядом, создающим поле в точке  $M$ ),  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся электроды.

Системы интегральных уравнений решали относительно искомым функций поверхностной плотности заряда на электродах, исходя из ее дискретизации методом Крылова-Боголюбова [1 – А, 12 – А]. В слоистых средах учет связанных зарядов осуществляли методом зеркальных отражений [1 – А, 28 – А].

Полученные в диссертационной работе расчетные зависимости диэлектрических и геометрических характеристик позволили разработать ЭП для неразрушающего контроля компонент тензора диэлектрических свойств. В случае НИК, заполненного трехслойной средой (рисунок 1), выражения для потенциалов точек на поверхностях электродов центральной секции  $\Gamma(x_j)$ , обращенных к подложке ( $0 \leq x_j \leq r_0$ ,  $r_1 \leq x_j \leq r_2$ ,  $r_3 \leq x_j \leq r$ ,  $z = b$ ) и контролируемому материалу ( $r_1 \leq x_j \leq r_2$ ,  $r_3 \leq x_j \leq r$ ,  $z = b + d$ ) с учетом толщины электродов  $d$ , записывали в виде:

$$\begin{aligned}
 V(x_j) = & -\frac{1}{\varepsilon_2 \varepsilon_0 2\pi} \sum_{i=1}^{n_1+...+n_3} \left[ \gamma^s \lambda_{21} \psi_i(0, x_j, d_{-d}) + \gamma^s \psi_i(0, x_j, d_{-d}) + \gamma^s \psi_i(1, x_j, -d_{-d}) + \right. \\
 & + \gamma^{s-1} \lambda_{23} \psi_i(1, x_j, -d_{-d}) + \left. \sum_{i=n_1+...+n_3+1}^{n_1+...+n_6} \left[ \gamma^s (1 + \lambda_{21}) \psi_i(0, x_j, 0_{-d}) + \gamma^{s-1} (1 + \lambda_{21}) \lambda_{23} \psi_i(1, x_j, 0_{-d}) \right] + \right. \\
 & \left. + \sum_{i=n_1+...+n_6+1}^{n_1+...+n_7} \left[ \gamma^s \beta_{12} \psi_i(0, x_j, b_{-d}) + \gamma^{s-1} \lambda_{23} \beta_{12} \psi_i(1, x_j, b_{-d}) \right] \right]. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Нижний индекс отвечает дополнительной математической операции для вычисления потенциала точек на поверхностях, обращенных к контролируемому материалу. Выражение для потенциала точек экрана 4 ( $0 \leq x_j \leq r$ ,  $z = 0$ ) записывали в виде:

$$\begin{aligned}
 V(x_j) = & -\frac{1}{\varepsilon_1 \varepsilon_0 2\pi} \sum_{i=1}^{n_1+...+n_3} \left[ \gamma^s \beta_{21} \psi_i(0, x_j, b+d) + \gamma^{s-1} \beta_{21} \lambda_{23} \psi_i(1, x_j, b-d) + \right. \\
 & + \sum_{i=n_1+...+n_3+1}^{n_1+...+n_6} \left[ \gamma^s \beta_{21} \psi_i(0, x_j, b) + \gamma^{s-1} \beta_{21} + \lambda_{23} \psi_i(1, x_j, b) \right] + \sum_{i=n_1+...+n_6+1}^{n_1+...+n_7} \left[ \psi'_i(x_j, -2s(h_i+d)) + \right. \\
 & \left. + \lambda_{12} \psi'_i(x_j, 2b - 2s(h_i+d)) + \gamma^{s-1} \lambda_{23} \beta_{21} \beta_{12} \psi_i(1, x_j, 2b) \right], \quad (3)
 \end{aligned}$$

где  $\psi_i(s, x_j, \phi)$  и  $\psi'_i(x_j, \phi)$  - вспомогательные функции:

$$\begin{aligned}
 \psi'_i(x_j, \phi) = & \sum_{m=1}^N \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \frac{\sigma_i(t)}{2} \ln \left| (2rm+t+x_j)^2 + (2s(h_i+d)+\phi)^2 \right| \left| (2rm-t+x_j)^2 + (2s(h_i+d)+\phi)^2 \right| \times \\
 & \times \left| (2rm-t-x_j)^2 + (2s(h_i+d)+\phi)^2 \right| \left| (2rm-t-x_j)^2 + (2s(h_i+d)+\phi)^2 \right| dt + \\
 & + \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \frac{\sigma_i(t)}{2} \ln \left| (t-x_j)^2 + \phi^2 \right| \left| (t+x_j)^2 + \phi^2 \right|, \quad j = 1, \dots, n_1 + \dots + n_7, \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\psi_i(s, x_j, \phi) = \sum_s^T \psi'_i(x_j, \phi), \quad (5)$$

где  $T$ - число отражений,

$N$ - число секций ЭП слева и справа от центральной,

$\alpha_i, \beta_i$  - границы участков интегрирования,

$n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$  - числа разбиений поверхностей на участки на двух сторонах электродов:  $n_1$  и  $n_4$  для электрода 1 на верхней и нижней сторонах,  $n_2$  и  $n_5$  для электрода 3 на верхней и нижней сторонах,  $n_3$  и  $n_6$  для электрода 2 на верхней и нижней сторонах и  $n_7$  для экрана 4.

С учетом, что общий заряд системы равен нулю:

$$\int_0^{\alpha_1} (\sigma_{11}(t) + \sigma_{12}(t)) dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (\sigma_{21}(t) + \sigma_{22}(t)) dt + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} (\sigma_{31}(t) + \sigma_{32}(t)) dt + \int_0^{\alpha_4} \sigma_4(t) dt = 0 \quad (6)$$

составляли систему  $n_1 + \dots + n_7 + 1$  интегральных уравнений. Ее решением являлись дискретные значения функций распределения поверхностных за-

рядов  $\sigma_{11i}$ ,  $\sigma_{12i}$ ,  $\sigma_{21i}$ ,  $\sigma_{22i}$ ,  $\sigma_{3i}$ ,  $\sigma_{4i}$  и потенциала  $V_2$ . Межэлектродную емкость  $C_{12}$  выражали через сумму заряда на обеих поверхностях:

$$C_{12} = \left[ \sum_{i=n_1+n_5+1}^{n_1+n_5+n_3} \sigma_{21}(x_i)l_i / (V_1 - V_2) + \sum_{i=n_1+n_2+n_3+n_4-n_5+1}^{n_3+n_2+n_3+n_4+n_5+n_6} \sigma_{22}(x_i)l_i / (V_1 - V_2) \right], \quad (7)$$

где  $l_i = \beta_j - \alpha_j$ .

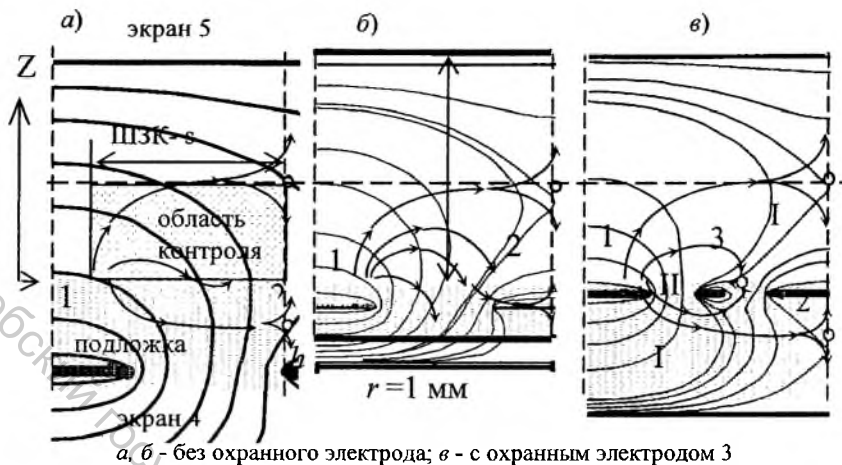
Расчеты емкости  $C_{12}$  накладных конденсаторов на подложке из тефлона ( $\epsilon_1 = 2,1$ ) толщиной 254 мкм в воздухе, выполненные предложенным в диссертации методом, расчеты, выполненные коммерческой программой анализа и оптимизации электродинамических систем (Ansoft FEM), сравнивали с экспериментальными результатами, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные и измеренные значения емкости  $C_{12}$  НИК

Размер секции, мм	2r=1	2r=2,5	2r=5
Отношение металлизации ( $2r_0/r$ )	0,396	0,469	0,476
Толщина электродов d, мкм	14	14	14
Экспериментальное значение емкости $C_{12}$ , пФ	2,663	1,536	0,935
Расчетное значение емкости FEM(Ansoft) $C_{12}$ , пФ	2,769	1,591	0,895
Ошибка расчета $C_{12}$ с помощью FEM (Ansoft), %	3,8	3,5	4,3
Расчетное значение емкости $C_{12}$ , пФ	2,718	1,482	0,924
Ошибка расчета $C_{12}$ , %	2,1	3,5	1,2
Ошибка расчета $C_{12}$ в случае пренебрежения толщиной d, %	7,3	10,8	7,4

Предложенный численный метод в расчете накладных конденсаторов дает ошибку 1,2 – 3,5 %. В работе показано, что пренебрежение толщиной электродов (электроды рассматриваются как бесконечно тонкие) приводит к ошибке в вычислениях межэлектродной емкости – 7 ÷ 10%. Если отклонения в профиле сечения электродов составляют для верхней и нижней поверхностей 10%, то отклонения значений емкостей составляют приблизительно 11%.

Метод зеркально-симметричных схем использован для создания численных моделей экранированного и зеркально-симметричного конденсаторов, составными частями конструкций которых является накладной конденсатор. Расчетные картины полей 2D моделирования трех ЭНИК в воздухе ( $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 1$ ) приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Расчетные картины электрических полей ЭНИК**

Преобразователи ЭНИК имеют одни и те же параметры: толщина электродов  $d = 7$  мкм, размер секции  $r = 1$  мм, ширина потенциальных электродов  $r_0 = r - r_3 = 0,25$  мм. Материал подложек - тефлон ( $\epsilon_1 = 2,1$ ) [72–А]. Экран 5 отсекает часть потока силовых линий напряженности и увеличивает горизонтальную составляющую напряженности электрического поля, что крайне важно для контроля анизотропии диэлектрических свойств анизотропных материалов [64–А]. Отклонение полей от плоскопараллельных на концах электродов в их пяточной части (рисунок 3) приводит к методической ошибке определения диэлектрической проницаемости, не позволяя интерпретировать результаты измерений в силу расхождений между результатами теоретических расчетов и экспериментальных данных.



**Рисунок 3 – Торцы электродов ЭП**

Для верификации результатов численных расчетов плоскопараллельных полей была предложена и разработана методика учета и исключения краевого эффекта на торцах электродов [61–А, 66–А]. Разработан-



ная методика для определения доли емкости, создаваемой полем на торцах электродов [16 – А, 17 – А, 61 – А, 66 – А], состоит из целого ряда последовательных операций: а) изготовления датчиков с различной длиной электродов  $L_1$  и  $L_2$ , но одинаковой конфигурацией и геометрией; б) контроля размеров электродов под микроскопом «Микромед Р-1-LED» (абсолютная погрешность измерения размеров которого  $X \pm \Delta$ ,  $\Delta = 0,003$  мм); в) выбраковки датчиков, металлизация поверхностей которых отличается более, чем на 0,5 %; г) определения емкости  $C = C_1 - C_2$ , создаваемой плоскопараллельным участком поля,

где  $C_1$ ,  $C_2$  емкости датчиков, соответствующие электродам с длинами  $L_1$  и

$L_2$ ; д) вычисления емкости  $C_i^*$ , создаваемой полем на концах электродов в их пяточной части как  $C_i^* = C_i - \beta C L_i / (L_1 - L_2)$ , где  $L_i = L_i - r_i$ ,  $i = 1, 2$ ;

е) вычисления доли емкости  $\delta C_i^*$ , создаваемой полем на концах электродов в их пяточной части  $\delta C_i^* = 1 - C_i^* / C_i$ ; ж) вычисления погрешности

расчета емкости, создаваемой линейным участком поля  $\delta C_i^P = |1 - C_i^P / C_i|$ ; определения длины электрода, эквивалентной длине его мейандра.

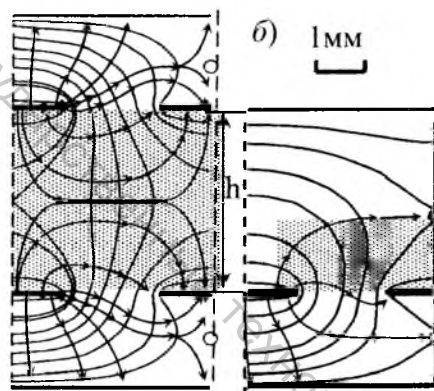
Результаты экспериментальных и теоретических исследований для НИК с экраном и без него представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные и измеренные значения доли емкости, создаваемой полем на концах электродов преобразователей в воздухе  $\delta C_i^*$

(краевой эффект)

г, мм	$r_0$ , мм	$\beta$	h, мм	$L_1$ , мм	$C_1$ , пФ	$L_2$ , мм	$C_2$ , пФ	$C_i^P$ , пФ	$C_i^*$ , пФ	$\delta C_i^P$ , %	$\delta C_i^*$ , %
3,916	1,024	0,523	$\infty$	26	1,093	24	1,004	1,007	0,29	15	
3,890	1,024	0,526	$\infty$	52	2,097	50	1,930	1,959	1,50	8	
5,874	1,517	0,516	$\infty$	26	0,53	24	0,484	0,478	1,26	19	
5,886	1,507	0,512	$\infty$	26	0,529	24	0,485	0,471	2,84	19	
5,872	1,500	0,511	$\infty$	26	0,534	24	0,480	0,470	1,95	20	
5,949	1,514	0,508	$\infty$	52	1,014	50	0,923	0,880	2,77	11	
3,890	1,024	0,526	7,98	52	1,937	50	1,758	1,795	2,19	9	
3,890	1,024	0,526	3,99	52	1,689	50	1,521	1,554	2,45	10	
3,916	1,024	0,523	7,99	26	1,023	24	0,914	0,919	0,62	18	
3,916	1,024	0,523	3,98	26	0,898	24	0,791	0,796	0,63	19	

Правомерность созданного метода зеркально-симметричных схем при расчете полей НИК и ЭНИК подтверждается ошибками расчета емкостей  $\delta C_i^P < 3\%$ . Показано, что самыми важными вкладчиками, приводящими к несоответствию между теоретическими и измеренными значениями импеданса, являются краевые эффекты на торцах электродов, а также толщина электродов, которые проявляются для миниатюрных ЭП, когда длина электродов сравнима с шириной ЭП, в датчиках контроля анизотропии диэлектрических свойств материалов. В диссертации проведен расчет полей зеркально-симметричных [21-А, 37-А] и экранированных накладных конденсаторов рисунок 4. Дан анализ их основных характеристик.



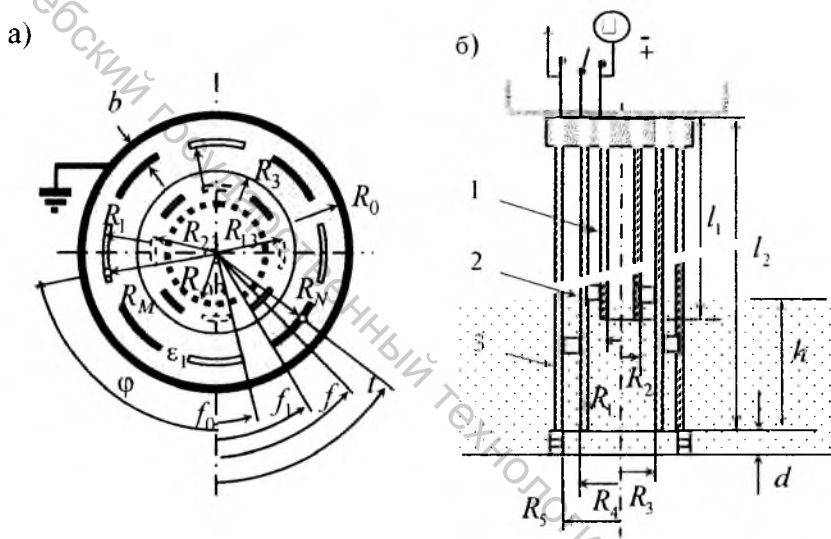
а – ЗСНИК; б – ЭНИК

Рисунок 4 – Расчетные картины электрических полей

Глубина контролируемой зоны для ЭНИК составляет менее половины межэлектродного зазора  $h$  и равна  $0,41h$ , в то время как ЗСНИК контролирует весь объем межэлектродного пространства  $h$  (на рисунке 4 они затонированы). Различия касаются ширины зон контроля и емкостей. Так для ЗСНИК ширина зоны контроля соответствует ширине секции  $r$ , для ЭНИК –  $0,81r$ .

Для контроля уровня жидких сред традиционно используют преобразователи, представляющие собой цилиндрический конденсатор. Загрязнение рабочей поверхности такого преобразователя требует разборки и, как следствие, новой тарировки. Конструкции НИК лишены такого неудобства [9 – А, 41 – А, 51 – А–54 – А, 58 – А, 60 – А, 62 – А, 80 – А], однако они подвержены кумулятивному эффекту и не осуществляют демпфирование жидкости [16 – А, 81 – А].

Для устранения этих недостатков разработан преобразователь [11 – А, 16 – А, 82 – А] в виде свернутого в трубку накладного конденсатора (рисунок 5, а). Такая конструкция, в отличие от НИК, обеспечивает устранение кумулятивного эффекта, производит демпфирование колебаний контролируемой жидкости, обладает жесткостью, не требует разборки для очистки рабочих поверхностей. Математическую 3D модель преобразователя, электроды которого изолированы, строили согласно разработанной методике, в представлении электродов в виде двух эквипотенциальных частей, симметричных относительно оси преобразователя.



а – в виде свернутого НИК; б – двухпараметрового датчика уровня

**Рисунок 5 – Вид сечения цилиндрических ЭП**

Установлено [16 – А], что существуют оптимальные размеры преобразователя, при которых изменение емкости, вызванное заполнением преобразователя контролируемой жидкостью, максимально. Рассматривали преобразователи с геометрическими размерами:  $R_0=12.5$  мм,  $R_1=10.5$  мм,  $R_2 = R_1 - d = 10.48$  мм,  $R_3 = 8.0$  мм, у которых подложка и изоляция выполнены из полипропилена ( $\epsilon_1 = 2.4$ ), число секций варьировали от 2 до 8. В случае заполнения преобразователя маслом ( $\epsilon_2 = 2.2$ ) максимальное изменение емкости преобразователя наблюдается при отсутствии слоя изоляции, при числе секций  $n = 6$ . Наличие слоя изоляции на поверхности электродов датчика приводит к смещению максимумов в область меньшего числа секций.

Проведено численное 3D моделирование двухпараметрового цилиндрического датчика уровня в слоистых средах, с учетом толщины электродов [23 – А] (рисунок 5, б). Поверхность каждого цилиндрического электрода рассматривается в виде двух составных эквипотенциальных цилиндров. Установлены области применения классического выражения емкости цилиндрического конденсатора: длина электродов  $l$  должна быть на порядок больше радиуса внешнего цилиндра  $R_5$ , в этом случае ошибка в использовании классического выражения емкости менее 2%, а погрешность расчета численным методом менее 0.5%.

Созданные модели ЭНИК и ЗСНИК носят универсальный характер и включают в себе модели НИК. Пакет программ, созданный на основе представленных моделей, может с успехом применяться для проектирования электроемкостных преобразователей, МЭМС – устройств.

**В третьей главе** дан анализ существующих методик определения основных характеристик электроемкостных преобразователей, предложены новые методические решения определения паразитной и рабочей емкости плоских накладных конденсаторов [4 – А, 77 – А], глубины зоны их контроля [40 – А, 79 – А].

В основу методик определения глубины зоны контроля положена регистрация изменения емкости накладного конденсатора при поднесении плоского объекта. Глубина зоны контроля определяется координатой  $z$ , где различие между емкостью в положении  $C_{z=0,03}$  и асимптотической емкостью  $C_\infty$  составляет 3 % от максимального изменения при внесении плоского объекта. При таком подходе измеряется отклик изменения поля преобразователя на вносимый объект.

Предложена методика определения зон контроля, основанная на регистрации изменения емкостей двух зеркально-симметричных накладных конденсаторов, когда поля, взаимодействуя, оказывают влияние друг на друга [40 – А, 48 – А, 79 – А]. В силу того, что сразу регистрируется изменение емкости двух идентичных накладных конденсаторов, то чувствительность к изменению емкости по сравнению с методикой, основанной на поднесении изолированного плоского проводника, возрастает в два раза.

Область контроля ЭНИК ограничена изолиниями потока электрического поля, замыкающегося на экран 5, и зависит от его положения (рисунок 2). Глубину зоны контроля  $h^*$  находили через координату  $z$  точки раздела потока электрического поля на два: - поток, замыкающийся на экран 5, и поток, замыкающийся на электрод ощущения 2. Эта точка лежит на оси симметрии  $x = r$  и является точкой локального экстремума функции потенциала электрического поля  $\partial V(r, b + h^*) / \partial z = 0$  [64 – А]. Ширину зоны контроля  $s$  определяли через координату точки раздела этих потоков  $x^*$ , находящуюся на поверхности электрода 1. Согласно теореме Гаусса:

$$\left| \int_0^{x^*} \sigma(x, z = b + d) dx \right| = \left| \int_{r_1}^r \sigma(x, z = b + h) dx \right|, \quad (8)$$

ширина зоны контроля  $s = r - x^*$ .

Когда заземленный экран 5 удален, глубина зоны контроля составляет  $h^* \approx 0,33$  мм, ширина зоны контроля  $s$  совпадает с размером секции и равна  $s = 1$  мм. При размещении экрана 5 на расстоянии  $h = 1$  мм от плоскости компланарных электродов глубина зоны контроля  $h^*$  возрастает и принимает значение  $h^* \approx 0,41$ , ширина зоны контроля сужается до значения  $s = 0,81$  мм (рисунок 2). Показано, что при уменьшении толщины подложки до  $b = 0,254$  мм (рисунок 2б), доля потока, замыкающегося на экран 4 в основании подложки, увеличивается, поле выпучивается вверх, увеличивая глубину зоны контроля до  $h^* \approx 0,44$  мм, а ширину зоны контроля до  $s = 0,83$  мм [64 – А], значение емкости  $C_{12}$  между потенциальными электродами 1, 2 падает, и сила сигнала уменьшается. Аналогичный эффект возникает и при размещении охранного электрода шириной  $r_2 - r_1 = 0,1$  мм (рис.2в). Установлено [63 – А], что конструкциям ЭНИК с охранным электродом (рисунок 2в) присуща аномальная область измерений, когда с ростом диэлектрической проницаемости материала, межэлектродная емкость  $C_{12}$  уменьшается по сравнению с емкостью незаполненного ЭНИК, а также наличие неоднозначности (двойственности) результата измерений (рисунок 7).

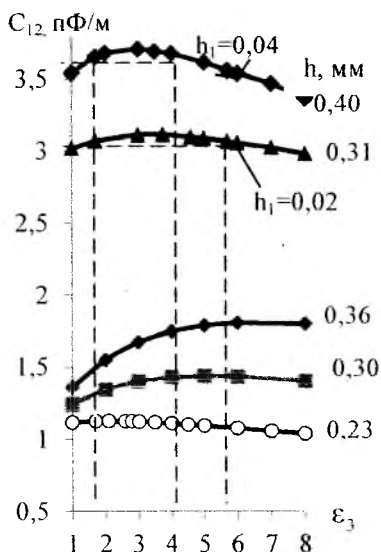
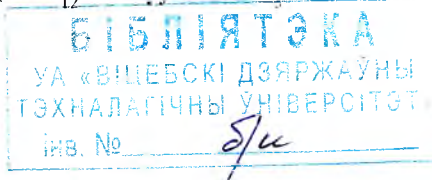


Рисунок 7 – Межэлектродная емкость единицы длины электродов  $C_{12}$  как функция  $\epsilon_3$



Обусловлено это тем, что емкость датчика определяется потоками напряженности электрического поля, замыкающимися на электрод «ощущения» в области контролируемого диэлектрика и подложке. В аномальной области измерений размещение материала с большей диэлектрической проницаемостью приводит к ослаблению роли экрана в подложке и усилению экрана над материалом, в результате поток в подложке падает, и как следствие, падает емкость. Ширина аномальной области измерений определяется величиной воздушного зазора  $h_1$  (рисунок.8). С ростом зазора  $h_1$  верхняя граница аномальной области смещается вправо. Она размыта и представляет собой очень узкий диапазон критических толщин слоя  $h$  (на рисунке 8 он представлен жирными точками). В критическом диапазоне, диэлектрикам с различной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3 = 1,7$  и  $\epsilon_3 = 5,7$ , имеющим толщину  $h = 0,31$  мм, воздушный зазор  $h_1 = 0,04$  мм, соответствует одинаковое значение емкости  $C_{12} = 3,1$  пФ/м. Для конденсаторов с охранными электродами шириной  $r_2 - r_1 = 0,1$  мм, в случае воздушного зазора  $h_1 = 0,04$  мм, диапазон критических толщин  $h$  составляет  $0.23 \div 0.36$  мм. Наличие неоднозначности (двойственности) результата измерений в диапазоне критических толщин не позволяет судить об анизотропии материала.

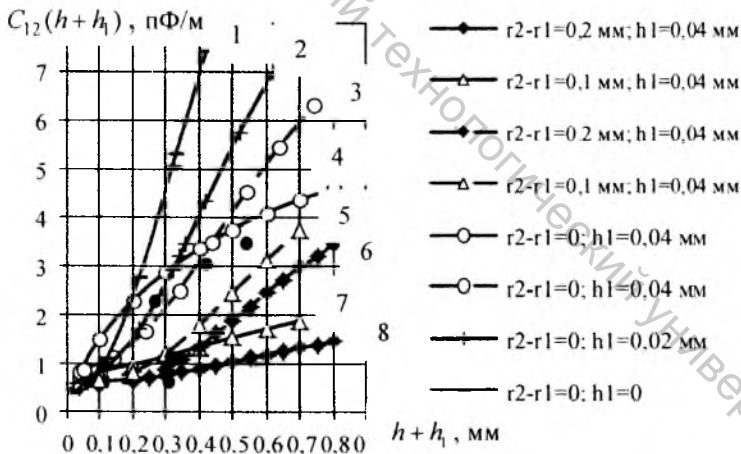


Рисунок 8 - Зависимость межэлектродной емкости  $C_{12}$  на единицу длины от расстояния  $h+h_1$  между заземленным экраном 5

В этом случае границей поля является половина расстояния между плоскостями электродов двух накладных конденсаторов, находящихся

в воздухе, начиная с которого, поля конденсаторов не оказывают влияния друг на друга, и общая емкость преобразователей остается неизменной [4 – А]. Установлено, что для преобразователей на тонких подложках глубина зоны контроля составляет  $\approx 0.6r$ , на толстых подложках  $\approx 0.4r$ . Для преобразователей на тонких подложках большая глубина зоны контроля объясняется выпучиванием потока силовых линий вверх от плоскости электродов за счет потока, который замыкается на экран в подложке.

Для преобразователей на толстых подложках влияние экранов в основаниях подложек ничтожно мало. Паразитная составляющая межэлектродной емкости  $C_n$  практически не изменяется с разнесением зеркально-симметричных накладных конденсаторов. Это позволяет измерять не только паразитную составляющую межэлектродной емкости  $C_n$ , но и рабочую составляющую для накладного конденсатора на толстой подложке [77 – А], как:

$$C_p = 0,5(C_\infty - C_n), \quad (9)$$

где  $C_n$  - емкость, измеренная в случае зеркального совмещения накладных конденсаторов;

$C_\infty$  - суммарная емкость двух разнесенных конденсаторов.

Разработанные методики позволяют определять паразитную и рабочую емкости, а также глубину зон контроля плоских накладных конденсаторов с любой конфигурацией электродов. Зеркальному совмещению двух контуров электродов соответствует минимальное значение емкости.

**Четвертая глава** посвящена формированию плоскопараллельных полей с помощью новых конструкций электроемкостных преобразователей, разработке аналитических моделей ЭП для неразрушающего контроля анизотропных полимерных материалов [1 – А, 2 – А, 8 – А, 19 – А, 24 – А - 31 – А, 34 – А-36 – А, 43 – А, 49 – А, 70 – А]. Расчеты выполнены методами конформных отображений и непосредственного определения напряженности электрического поля. Аналитические выражения для емкостей разработанных конструкций ЭП представлены в таблице 3.

Эти выражения использовались в последующем для ряда частных задач при сравнении сходимости и точности численных методов расчета, проводимых для анизотропных и слоистых сред, оценки основных характеристик проектируемых ЭП, таких как рабочие и паразитные емкости; глубина зоны контроля (ГЗК) [4 – А, 40 – А, 79 – А], ширина зоны контроля (ШЗК) [48 – А]; функций преобразования – зависимость емкостей конденсатора от входных параметров [11 – А, 2 – А, 8 – А, 19 – А, 22 – А, 29 – А, 30 – А, 49 – А, 53 – А - 55 – А, 58 – А]; распределения напряженности электрического поля в исследуемом материале [1 – А, 2 – А, 8 – А]. Показано, что созданные аналитические модели носят универсальный характер и содержат в себе модели накладных измерительных конденсаторов [1 – А]. Расчетные выражения электрического поля, рабочих емкостей,

Таблица 3 - Выражения для расчета емкостей ЭНИК и ЗСНИК в однородной среде

	$C_p = \frac{\int_{a_5}^{a_6} \frac{(\xi - c_0) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_1)(\xi - a_2)(\xi - a_3)(\xi - a_4)(\xi - a_5)(a_6 - \xi)}}}{\int_{a_2}^{a_3} \frac{(c_0 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_1)(\xi - a_2)(a_3 - \xi)(a_4 - \xi)(a_5 - \xi)(a_6 - \xi)}}$ $a_i = \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot r_i}{2r} \right)$
	$C = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{(c_1 - \xi)(c_2 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_6)(\xi - a_5)(\xi - a_4)(\xi - a_3)(\xi - a_2)(a_1 - \xi)(a_7 - \xi)}}}{\int_{a_3}^{a_4} \frac{(c_1 - \xi)(c_2 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_6)(\xi - a_5)(a_4 - \xi)(a_3 - \xi)(a_2 - \xi)(a_1 - \xi)(a_7 - \xi)}}$ $\int_{a_3}^{a_4} \frac{(c_1 - \xi)(c_2 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_6)(\xi - a_5)(\xi - a_4)(\xi - a_3)(a_2 - \xi)(a_1 - \xi)(a_7 - \xi)}} = 0;$ $\int_{a_1}^{a_2} \frac{(c_1 - \xi)(c_2 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_6)(\xi - a_5)(\xi - a_4)(\xi - a_3)(\xi - a_2)(\xi - a_1)(a_7 - \xi)}} = 0.$
	$C_p = \frac{\int_{a_5}^{a_6} \frac{(c_1 - \xi)(c_2 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_1)(\xi - a_2)(\xi - a_3)(\xi - a_4)(\xi - a_5)(a_6 - \xi)(a_7 - \xi)}}}{\int_{a_2}^{a_3} \frac{c_1 - \xi)(c_2 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_1)(\xi - a_2)(a_3 - \xi)(a_4 - \xi)(a_5 - \xi)(a_6 - \xi)(a_7 - \xi)}}$ $a_i = \operatorname{sn}^2 \left( \frac{r_i}{r} G(g), g \right), \text{ где } \frac{h}{r} = \frac{G'(g)}{G(g)}, c_1 \text{ и } c_2 - \text{особые точки}$
	$C_p = \frac{\int_{a_5}^{a_6} \frac{(\xi - c_0) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_1)(\xi - a_2)(\xi - a_3)(\xi - a_4)(\xi - a_5)(a_6 - \xi)}}}{\int_{a_2}^{a_3} \frac{(c_0 - \xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - a_1)(\xi - a_2)(a_3 - \xi)(a_4 - \xi)(a_5 - \xi)(a_6 - \xi)}}$ $a_i = \operatorname{sn}^2 \left( \frac{r_i}{r} G_0(g_0), g_0 \right); \frac{h}{2r} = \frac{G'_0(g_0)}{G_0(g_0)}, c_1, c_2 - \text{особые точки}$

функций преобразования, частных производных по входным параметрам, геометрическим размерам электродов, распределения напряженностей по-



ля в случае  $h \rightarrow \infty$  переходят в аналогичные выражения для накладных конденсаторов [1 – А].

Показано, что разработанные зеркально-симметричные конструкции накладных конденсаторов в сравнении с традиционно используемыми накладными конденсаторами обладают более широким спектром функциональных возможностей [4 – А]. Они позволяют: а) контролировать анизотропию физических свойств линейно-протяженных материалов [3 – А, 5 – А, 21 – А, 25 – А, 75 – А]; б) осуществлять последний контроль [7 – А, 75 – А]; в) на их основе проводится оценка глубины и ширины зон контроля плоских накладных конденсаторов [5 – А, 40 – А, 48 – А, 79 – А], определяются рабочие и паразитные емкости накладных конденсаторов на толстых подложках [77 – А].

Выявлено, что для экранированных и зеркально-симметричных накладных конденсаторов в области малых межэлектродных расстояний  $h$ , когда  $h < 2r$ , наиболее жесткие требования необходимо предъявлять к точности выполнения межэлектродных зазоров, определяемых координатами  $r_0$  и  $r_1$ . С ростом  $h$  погрешности расчета по всем входным параметрам  $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  приобретают постоянные значения, соответствующие конструкциям независимых накладных конденсаторов.

*Пятая глава* посвящена методологии контроля анизотропии диэлектрических свойств полимеров, обладающих слабой анизотропией физико-механических свойств [1 – А, 3 – А, 5 – А, 18 – А, 32 – А, 46 – А, 50 – А, 57 – А, 63 – А, 69 – А, 71 – А].

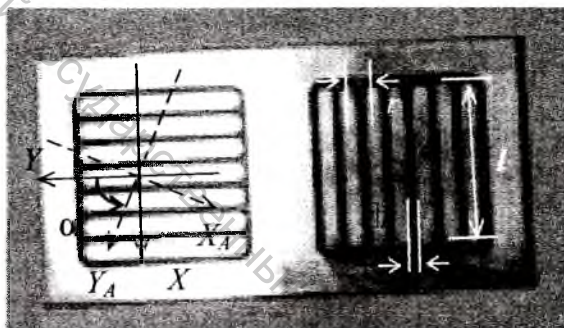
В случае однопараметрового контроля получить достоверные результаты об анизотропии диэлектрических свойств материала традиционным неразрушающим методом посредством накладных измерительных конденсаторов (рисунок 9) не представляется возможным.

Во-первых, составляющая сигнала, снимаемого первичным преобразователем в его пяточной части, является интегральной и несет информацию об искажении полей на торцах ленточных электродов и, как результат, ведет к методическим погрешностям определения значений компонент тензора диэлектрической проницаемости в направлениях осей анизотропии.

Во-вторых, глубина зоны контроля накладных конденсаторов должна быть меньше минимальной толщины материала [1 – А].

В-третьих, большая часть тонких полимерных материалов (волокна, искусственные и синтетические кожи, пленки, покрытия, ткани, картон, стеклопластики и т.д.) имеют неквазигомогенную структуру. Неоднородности структуры могут быть сравнимы с толщиной материалов. В силу этого, выполнение узких ленточных электродов приведет к соразмерности неоднородностей и размеров накладных конденсаторов и, как следствие, к методическим погрешностям измерения. В-четвертых, у линейно-протяженных полотнообразных материалов нет доступа к двум ортогональным поверхностям, и это не позволяет определять константы диэлек-

трической проницаемости согласно методике, основанной на использовании накладных конденсаторов. Иное методическое решение, предложенное автором, позволило устранить вышеперечисленные недостатки [1 – А, 59 – А, 75 – А, 84 – А] за счет создания плоскопараллельного поля в разработанных ленточных конструкциях экранированных и зеркально-симметричных накладных конденсаторов. С целью обоснования разработанных методик и сравнения с известной методикой неразрушающего контроля диэлектрических свойств изотропных материалов посредством накладных измерительных конденсаторов (рисунок.9) были созданы математические модели ленточных экранированных [26 – А, 35 – А] и зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов [5 – А, 34 – А].



**Рисунок 9 – Расположение ленточных электродов МНИК по отношению к осям анизотропии материала**

Алгоритм расчета электрического поля ЭП в изотропной среде заключался в сведении задачи к расчету в изотропной однородной среде и последующем решении ее методами конформных преобразований и непосредственного определения напряженности поля [3 – А]. Изотропизирующее преобразование координат:

$$\begin{pmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{\epsilon_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\epsilon_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\epsilon_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (10)$$

позволило перейти к координатам изотропизированного пространства:

$$\begin{aligned} x_u &= \left( \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_x} \cdot \cos^2 \alpha + \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_y} \cdot \sin^2 \alpha \right) \cdot x + \left( \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_x} - \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_y} \right) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot y, \\ y_u &= \left( \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_x} - \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_y} \right) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot x + \left( \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_y} \cdot \cos^2 \alpha + \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_x} \cdot \sin^2 \alpha \right) \cdot y, \quad z_u = z \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\epsilon_z, \epsilon_y, \epsilon_x$  - значения компонент тензора диэлектрических проницаемостей вдоль осей анизотропии.

Аналитические выражения для основных характеристик конденсаторов, создающих плоскопараллельные поля, показывают, что если плоскость, в которой замыкаются силовые линии напряженности электрического поля, составляет угол  $\alpha$  с осями анизотропии контролируемого материала (рисунок 9), то нормированная емкость  $C(\alpha)/C_0$  накладного измерительного конденсатора не зависит от его геометрических размеров и определяется только диэлектрическими свойствами контролируемого материала:  $C(\alpha)/C_0 = \sqrt{\epsilon_z \epsilon_x \cos^2 \alpha + \epsilon_z \epsilon_y \sin^2 \alpha}$ , в то время как относительные емкости зеркально-симметричного и экранированного накладных измерительных конденсаторов определяются не только диэлектрическими свойствами материала, но и геометрическими размерами преобразователя [1 - А, 3 - А].

Показано, что наибольшей относительной чувствительностью к анизотропии в плоскости контролируемого материала обладают ленточные экранированные и зеркально-симметричные накладные конденсаторы [1 - А] (рисунок 10).

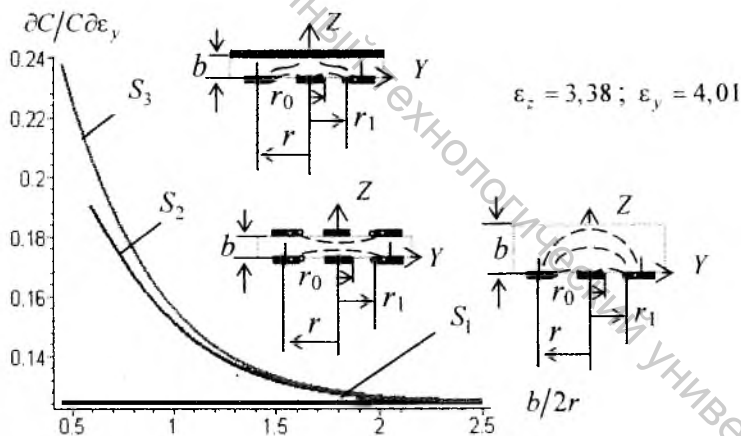


Рисунок 10 – Зависимость относительных чувствительностей емкостей к изменению  $\epsilon_y$  от  $h/2r$  при  $r = 3r_1$ ;  $r_0 = 0,05r_1$

В отличие от конструкций накладных конденсаторов методики неразрушающего контроля анизотропии диэлектрических свойств анизотропных материалов с использованием экранированных накладных измерительных конденсаторов [1 - А, 3 - А, 5 - А, 18 - А, 24 - А, 34 - А, 35 - А, 46 - А, 59 - А, 67 - А, 71 - А] позволяют за счет выбора геометриче-

ских размеров электродов повысить чувствительность и точность измерения анизотропии диэлектрических свойств в 1,5 – 2 раза по сравнению с методиками измерения анизотропии диэлектрических свойств, при использовании накладных конденсаторов; устраняют погрешности, вызванные кумулятивным эффектом, за счет экранирования [26– А, 35– А] области контроля зеркально-симметричными накладными и экранированными накладными конденсаторами.

Дифференциальная методика определения вклада краевых эффектов на торцах электродов в измеряемую емкость, основанная на использовании двух аналогичных датчиков с различной длиной электродов  $L_1$  и  $L_2$  и вычисления погонной емкости на единицу длины электродов  $\Delta C/\Delta L$ , позволяет повысить точность определения анизотропии диэлектрических свойств материалов, на 10% – 20% [17 – А, 66 – А].

В *шестой главе* рассмотрены вопросы, связанные с практическим применением разработанных автором средств НК [10– А, 11– А, 15– А, 20– А, 22– А, 32 – А, 33 – А, 38 – А, 39 – А, 47 – А, 50 – А, 80 – А – 84 – А]. Они стали результатом глубокого теоретического и экспериментального исследования физических явлений при электромагнитном контроле.

Решение прямой задачи электроемкостного контроля, заключающейся в анализе перераспределения электромагнитного поля, обусловленного наличием в контролируемом образце анизотропии электрической проводимости, диэлектрической проницаемости и вычислении показаний соответствующих электроемкостных датчиков поля, позволило подойти к решению обратной задачи. Зная геометрические размеры датчика и измеренную емкость, определяли диэлектрические проницаемости сухого льноволокна в перпендикулярном и параллельном направлениях. Установлено, что эффективные диэлектрические проницаемости сухого льноволокна в параллельном и перпендикулярном направлениях практически сохраняют постоянные значения в частотном интервале  $0.5 \div 100$  кГц и равны для чесаного (волокна длиной более 200 мм)  $\epsilon_{\perp}^{чес} = 1.97 \pm 0.06$  и

$\epsilon_{\perp}^{чес} = 1.20 \pm 0.03$ , котонизированного льноволокна (волокна длиной 30 -

70 мм)  $\epsilon_{\perp}^{кorp} = 1.84 \pm 0.05$  и  $\epsilon_{\perp}^{кorp} = 1.20 \pm 0.03$ . С увеличением влажности

контролируемого волокна происходит существенное увеличение анизотропии диэлектрической проницаемости (рисунок 11). Рост анизотропии диэлектрической проницаемости льноволокна на частоте 0.5 кГц больше роста анизотропии на частоте 100 кГц. Разработан способ определения влажности анизотропных материалов (волокон, лент, бумаги, шпона и т.д.) посредством контроля относительной анизотропии диэлектрических свойств [15 – А, 22 – А]. В качестве одного из информационных параметров использовали разность значений диэлектрической проницаемости

$(\epsilon_{\square} - \epsilon_{\perp})_{\nu}$ , измеренную вдоль осей анизотропии на низкой частоте ( $\nu = 0,5$  кГц), а второго – разность констант тензора диэлектрической проницаемости, измеренную вдоль осей анизотропии на частоте на 2 порядка выше ( $\nu = 100$  кГц) [15 – А]. Дифференциальный способ измерения позволил устранить интегральную составляющую диэлектрической проницаемости на торцах электродов и влияние окружающей среды на результат измерений.

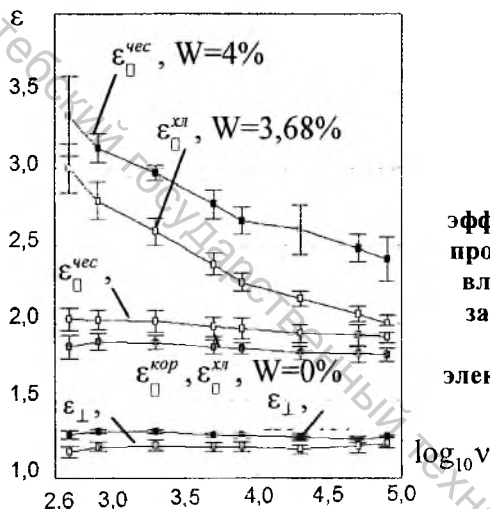


Рисунок 11 – Изменения эффективной диэлектрической проницаемости при различной влажности  $W$  льноволокна в зависимости от десятичного логарифма частоты электромагнитного поля  $\log_{10} \nu$

Показано, что чувствительность ЭНИК к анизотропии определяется геометрическими размерами экранированного накладного измерительного конденсатора. Оптимальное относительное расстояние  $h/\Delta r$  от экрана до плоскости электродов определяется максимумом зависимости относительной разности емкостей  $\square C / C_0(h/\square r)$ , измеренных в направлениях, параллельном и перпендикулярном структуре волокна, от  $h/\Delta r$ , где  $\Delta r$  – межэлектродное расстояние.

Диэлькометрии подвергали ленты льна, хлопка и смеси волокон (50% льна и 50% хлопка) [15 – А, 22 – А]. Предварительно волокна высушивали в сушильном шкафу при температуре  $50^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов. Затем отбирали образцы каждого волокна длиной  $0,2$  м и массой  $20,0 \pm 0,01$  грамма и размещали в рабочем объеме ЭНИК. Измеряли разности  $(C_{\square} - C_{\perp})_{\nu}$  и  $(tg\delta_{\square} - tg\delta_{\perp})_{\nu}$ . Установлено (рисунок 12(а)), что по мере роста влажности льноволокна наблюдается рост относительного коэффициента анизотропии диэлектрической проницаемости  $k_1(\nu) = (\epsilon_{\square} - \epsilon_{\perp})_{\nu} / (\epsilon_{\square} - \epsilon_{\perp})_{100} \approx (C_{\square} - C_{\perp})_{\nu} / (C_{\square} - C_{\perp})_{100}$  во всем частотном диапа-

зоне от 0,5 кГц до 100 кГц. Наибольшие изменения происходят в области 0,5 кГц. Это связано с дипольной поляризацией молекул воды. Диполи адсорбированных молекул воды ориентированы преимущественно вдоль молекулярных связей волокон. По этой причине наблюдается значительный рост диэлектрической проницаемости вдоль волокон. Зависимость относительного коэффициента анизотропии тангенса потерь  $k_2(\nu) = (\text{tg}\delta_{\parallel} - \text{tg}\delta_{\perp})_{\nu} / (\text{tg}\delta_{\parallel} - \text{tg}\delta_{\perp})_{100}$  от влажности льноволокна имеет свою специфику (рисунок 12(б)). Для льноволокна имеющего влажность  $W \geq 6\%$ , происходят изменения скоростей роста тангенсов потерь вдоль волокон и в перпендикулярном направлении. Это связано с увеличением доли водных включений в межволоконном пространстве, что приводит к росту ионной проводимости во всех направлениях, в том числе и в перпендикулярном направлении для волокон льна. Аналогичный характер в поведении относительных коэффициентов анизотропии наблюдался и для лент из чистого хлопка и смеси хлопок - лен.

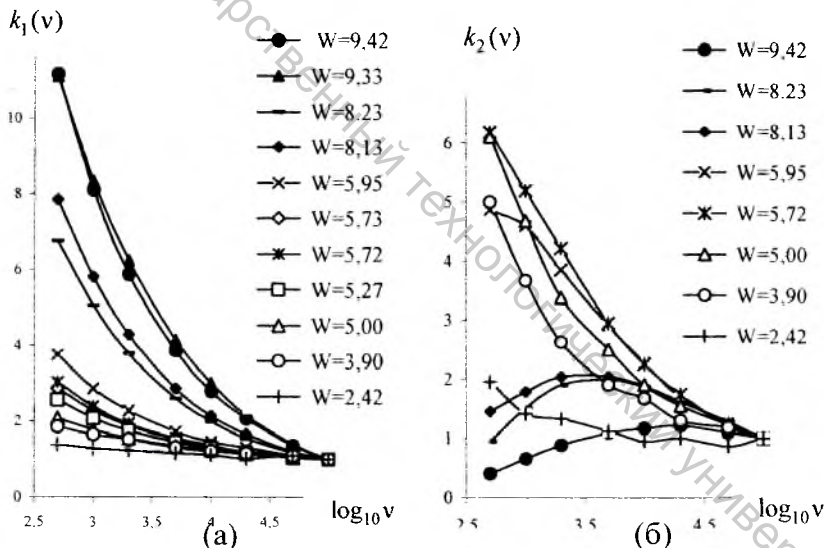


Рисунок 12 – Зависимость относительных коэффициентов анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса потерь от частоты электромагнитного поля

Анализ диэлькометрических измерений показывает, что в качестве наиболее информационного параметра, характеризующего влажность волокна, следует выбирать относительный коэффициент анизотропии диэлектрической проницаемости. Значения этого параметра практически не зависят от влажности и температуры окружающей среды.

Установлено, что зависимости натурального логарифма относительного коэффициента анизотропии диэлектрической проницаемости от влажности лент носят линейный характер. Аппроксимирующие функции имеют вид:

$$\text{для смеси } \ln(k_1(0,5)) = 0,3537W - 0,3514,$$

$$\text{для льна } \ln(k_1(0,5)) = 0,3126W - 0,6182,$$

$$\text{для хлопка } \ln(k_1(0,5)) = 0,395W - 0,6074.$$

Соответственно достоверность аппроксимации для смеси волокон - 0,98, для льна - 0,97 и хлопка - 0,96. Ошибка контроля влажности для льноволокна и хлопка составила не более  $\pm 0,6\%$ , смеси -  $\pm 0,8\%$ .

Разработанный метод контроля влажности для льноволокна и хлопка существенно отличается от известных ранее. Он позволяет осуществлять контроль влажности непосредственно в цехах, в дестабилизирующих условиях, когда средства контроля подвергаются электромагнитным воздействиям, происходят колебания влажности и температуры окружающей среды. Точность контроля влажности волокон по сравнению с известными аналогами выше на 0,5% - 1%.

Для прогнозирования прочностных и деформационных свойств анизотропных полимерных материалов была использована взаимосвязь физических и механических характеристик. Установлено, что наиболее информативным параметром, косвенно характеризующим прочностные и деформационные свойства анизотропных материалов, является емкость зеркально-симметричного накладного измерительного конденсатора. В области малых толщин контролируемых образцов  $h$  (межэлектродный зазор  $\square r \geq h$ ), рабочая емкость ленточных ЗСНИК прямо пропорциональна как значению диэлектрической проницаемости для выбранного направления, так и толщине контролируемого образца  $h$  [1 - А, 35 - А] и косвенно отражает число физических связей в сечении контролируемого образца. Между предельной прочностью образца  $P_p$ , напряжением при разрыве  $\sigma_p$ , относительным удлинением при разрыве  $\varepsilon_p$  и емкостью ЗСНИК, создающего поля в направлениях деформации образца, установлена прямопропорциональная зависимость [38 - А, 39 - А, 67 - А - 68 - А]. Статистическая обработка экспериментальных данных показала высокую корреляционную взаимосвязь между механическими характеристиками образцов и емкостями ЗСНИК. Для материала «барекс» двухпараметровая эмпирическая корреляционная зависимость имеет вид:

$$\begin{aligned} P_p (Н) &= - 790,78 + 310,05 C_x (\text{пФ}) + 0,1 C_y (\text{пФ}); \\ \sigma_p (\text{МПа}) &= - 2,90 + 1,10 C_x (\text{пФ}) + 0,03 C_y (\text{пФ}); \\ \varepsilon_p &= 290,0 - 66,51 C_x (\text{пФ}) + 0,06 C_y (\text{пФ}). \end{aligned} \quad (12)$$

Средние относительные ошибки аппроксимации не превышали 0,08; наименьший коэффициент корреляции составил 0,90 [39 – А, 67 – А].

Предложенная методика позволяет прогнозировать поведение прочностных свойств полимерных материалов, обладающих слабой анизотропией, не разрушая последних.

Разработан двухпараметровый датчик уровня жидкости, состоящий из трех цилиндрических электродов разной длины с варьлируемым потенциалом среднего электрода, создающий две емкости и позволяющий одновременно контролировать высоту уровня жидких сред и проводить оценку их качества [23 – А]. Получены аналитические выражения для вычисления высоты ее уровня  $h$  и диэлектрической проницаемости контролируемой среды  $\epsilon_2$ .

Для всех исследуемых жидкостей (ошибка определения уровня не превышала 1,5 мм). Датчик не требует калибровки, он имеет такие же размеры как и традиционный однопараметровый датчик уровня топлива.

**Приложение** включает: разработанные автором программы [42 – А] для проведения численных расчетов электрических полей широкого круга электроемкостных преобразователей; копии документов, подтверждающих практическую значимость диссертации и личный вклад автора.

## Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны физические основы создания высокоэффективных методов и средств контроля материалов, имеющих слабую анизотропию, на основе электроемкостных зеркально-симметричных схем преобразователей, обладающих повышенными точностными характеристиками и расширяющих технические возможности НК [1 – А].

Впервые предложена и теоретически обоснована методика моделирования электрических полей ЭП на основе представления источников заряда в виде двух зеркально-симметричных эквипотенциальных частей [12 – А, 13 – А, 14 – А, 16 – А, 20 – А, 21 – А, 22 – А, 23 – А], позволяющая повысить точность расчета основных характеристик ЭП в 2 раза при сокращении вычислительных затрат по памяти в 1,5...2 раза и по времени счета в 2...3 раза, а также рассчитывать поля ЭП с учетом их реальных геометрических размеров при контроле материалов, обладающих слабой анизотропией.

2. Впервые предложены и созданы универсальные математические модели для расчета многосекционных экранированных и зеркально-симметричных схем накладных измерительных конденсаторов [1 – А, 2 – А, 4 – А, 7 – А, 8 – А, 16 – А, 21 – А], включая традиционно применяемые многосекционные накладные измерительные конденсаторы, для определения базовых характеристик проектируемых ЭП, а также их рабочих и паразитных емкостей, глубины зоны контроля [4 – А, 40 – А,



79 – А] и ширины [48 – А], зависимостей емкостей ЭП от входных параметров [1 – А, 2 – А, 8 – А, 22 – А, 30 – А, 49 – А, 53 – А, 55 – А, 56 – А], что является основой для расчета высокоточных позиционных электроприводов и моделирования устройств нано- и микросистемной техники.

3. В результате теоретического анализа полей электроемкостных преобразователей установлен ряд различий в рабочих характеристиках ЭНИК и ЭНИК с охранными электродами, таких как сила сигнала, глубина зоны контроля, а также различия в аномальных областях, где обнаруживается двойственность результата в определении диэлектрической проницаемости контролируемого материала [20–А, 59–А] и влияния воздушных зазоров.

Показано, что для ЭНИК и ЭНИК с охранными электродами:

- глубина зоны контроля ограничена и не превосходит половины толщины контролируемого образца, в то время как для зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов она определяется размером межэлектродного пространства  $h$  [22–А];

- уменьшение толщины подложек подобно введению виртуального охранного электрода [58–А];

- в случае малого межэлектродного пространства, при наличии воздушных зазоров между материалом и плоскостью компланарных электродов ЭНИК, образуется аномальная область измерений, когда контролируемым диэлектрикам с большим значением диэлектрической проницаемости соответствует меньшее значение емкости [20–А];

- верхняя граница аномальной области измерений для ЭНИК с охранными электродами не исключается, сдвигаясь в область меньшего межэлектродного пространства по сравнению с межэлектродным пространством для ЭНИК [20–А];

- на границе аномальной области измерений за счет перераспределения потоков напряженности электрического поля возникает также двойственность результата измерений, заключающаяся в том, что диэлектрикам с различными значениями диэлектрической проницаемости, но одинаковой геометрией, соответствует одно значение емкости [20–А, 63–А].

Максимум чувствительности экранированных измерительных конденсаторов к анизотропии диэлектрической проницаемости определяется относительным межэлектродным зазором  $h/\Delta g$  и лежит в интервале  $1 \div 2$  [22 – А, 63 – А].

4. Предложена и обоснована методика определения глубины зоны контроля электроемкостных преобразователей [4 – А, 79 – А], что позволило повысить точность определения глубины зоны контроля накладного конденсатора в два раза по сравнению с традиционной методикой «поднесения плоского проводника». Разработана методика определения рабочей и паразитной емкостей для накладных конденсаторов на толстой подложке

ке, повышающая точность измерения емкостей за счет исключения применения жидкого диэлектрика с известной диэлектрической проницаемостью.

5. Разработана компенсационно-дифференциальная методика определения и исключения вклада краевого эффекта ленточных электродов в измеряемую емкость, основанная на использовании двух идентичных датчиков с различной длиной ленточных электродов  $L_1$  и  $L_2$ , и вычисления погонной емкости на единицу длины электродов  $\Delta C/\Delta L$ . Методика значительно упрощает процедуру определения краевого эффекта, длины эквивалентных извилин на торцах датчиков, повышает точность определения анизотропии диэлектрических свойств материалов, обладающих слабой анизотропией, диэлькометрическим методом на 10% – 20% [66 – А], а также позволяет проводить верификацию численных расчетов емкостей преобразователей, создающих как плоскопараллельные, так и осесимметричные поля [14–А, 17–А].

6. Разработаны конструкции датчиков на основе многосекционных экранированных и зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов [8 – А, 13 – А, 15 – А, 22 – А, 34 – А, 59 – А, 84 – А], позволяющие:

- измерять значения компонент тензора диэлектрической проницаемости анизотропных материалов с точностью, превосходящей в 2 раза точность измерений, реализуемых на базе традиционных конструкций накладных конденсаторов, и расширить диапазон диагностируемых материалов, включая анизотропные материалы [1 – А];

- повысить достоверность результатов НК на 20% за счет высокой чувствительности к анизотропии диэлектрических свойств контролируемых материалов [66 – А, 68 – А].

На основе конструкций многосекционных экранированных накладных измерительных конденсаторов и зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов разработаны методики электроемкостного неразрушающего контроля качества сырья для обнаружения и определения скрытых дефектов структуры (пороков в виде неоднородностей в контролируемом объекте), диагностики деформационных, прочностных свойств полимеров, природных биоматериалов. Для искусственных и природных анизотропных полимеров установлена высокая корреляционная взаимосвязь между их механическими параметрами: предельной прочностью  $P_p$ , напряжением при разрыве  $\sigma_p$ , относительным удлинением при разрыве  $\varepsilon_p$  и электрическими параметрами [38–А, 39–А, 67–А, 68–А], причем наименьший коэффициент корреляции составляет не менее 0,90, в то время как коэффициенты корреляции, установленные с помощью традиционных методик, основанных на применении НИК, не превышают 0,74.

7. Впервые экспериментально установлена зависимость анизотропии диэлектрических свойств деформируемых анизотропных материалов (волокон льна, хлопка, тканей) от влажности в частотном диапазоне от 0,5 кГц до 100 кГц. Показано, что определяющим информационным параметром, характеризующим их влажность, является коэффициент анизотропии диэлектрической проницаемости  $k_1(v) = (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})_v / (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})_{100}$ , уменьшающийся с частотой и независящий от влажности и температуры окружающей среды [15 – А, 22 – А]. Установлено, что относительный коэффициент анизотропии диэлектрической проницаемости практически не зависит от плотности заполнения рабочей области датчика контролируемым материалом. Разработана методика для определения влажности материалов с ортогональной анизотропией структуры [15–А, 22–А, 32 – А, 47 – А], которая позволяет проводить контроль влажности анизотропных материалов с точностью  $\pm 0,5\% - 1\%$  при наличии дестабилизирующих факторов, таких как внешние электромагнитные поля, колебания влажности и температуры окружающей среды.

8. Разработаны двухпараметровые электроемкостные датчики уровня жидких и сыпучих сред с плоской и цилиндрической геометрией [9 – А, 10– А, 11 – А, 16 – А, 22 – А, 41 – А, 51 – А, 52 – А, 57 – А, 60 – А, 62 – А, 80 – А - 83 – А], осуществляющие в процессе измерений постоянную самокалибровку для компенсации влияния внешних воздействий окружающей среды. Погрешность измерения уровня топлива составляет не более 1% независимо от сортности топлива, его температуры, наличия присадок, сторонних добавок, абсорбированной влаги.

9. Разработаны алгоритмы расчета электрических полей для широкого класса электроемкостных преобразователей и созданы пакеты программ [42 – А], позволяющие:

- проводить расчеты ЭП с учетом реальной толщины и конфигурации электродов, существенно упростив и ускорив процедуру вычислений при проведении научных и инженерных исследований;
- решать задачи оптимизации, осуществлять проектирование преобразователей при решении конкретных задач неразрушающего контроля.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные в рамках проведенного диссертационного исследования теоретические и практические результаты являются основой дальнейшего развития электроемкостных методов неразрушающего контроля. Разработанные новые методы и алгоритмы расчетов ЭП качественно и количественно отличаются от существующих методов и алгоритмов.

Диэлькометрический метод контроля влажности анизотропных материалов используется на Оршанском льнокомбинате для контроля влажности льнопряди, льноволокна, тканей (справка от 03.09.2011).

Методики неразрушающего контроля качества сырья (обнаружения скрытых дефектов структуры) используются на ООО «ОПТИМИКС<sub>ЛТД</sub>» (акт от 18 января 2012 г.), ОАО «Красный Октябрь» (акт от 25.05.2013), ОАО «Витебский комбинат шелковых тканей» (акт от 24.04.2013) для обнаружения скрытых дефектов кожгалантерейных изделий и оценки прочностных свойств, что позволило осуществлять входной контроль, проводить коррекцию технологических операций, повысить производительность, снизить энергозатраты.

Витебский завод электроизмерительных приборов приступил к освоению датчиков объема топлива (ОАО ВЗЭП, акт от 30.09.2013). Точность измерения уровня топлива составляет не более 1% независимо от сортности топлива, его температуры, наличия присадок, сторонних добавок, абсорбированной влаги. Потребность в таких датчиках автотранспортной промышленности Республики Беларусь составляет более 40 тыс. в год. В РФ на ООО «Импульс-Дент» внедрены датчики уровня жидких сред на основе многосекционных накладных измерительных конденсаторов.

Методы неразрушающего контроля анизотропии диэлектрических свойств композиции текстильных волокон с помощью многосекционных экранированных накладных измерительных конденсаторов, зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов, диэлькометрический метод контроля влажности и состава текстильных материалов [15 – А, 23 – А, 84 – А], методики измерения базовых характеристик ЭП внедрены и используются в учебном процессе кафедр «Прядение натуральных и химических волокон», «Автоматизация технологических процессов и производств» УО «ВГТУ» (акт от 23.11.2011, акт от 28.10.2005).

Определены направления перспективного использования результатов исследований, включающие:

- применение разработанной экспресс методики контроля влажности анизотропных материала с точностью  $\pm 0,5\%$  - 1% в условиях дестабилизирующих факторов;

- применение методики обнаружения и определения скрытых дефектов структуры (пороков в виде неоднородностей в контролируемом объекте), диагностики деформационных, прочностных свойств природных биоматериалов (кожи, лен, хлопок, шерсть, бумага, древесина) на предприятиях легкой промышленности для коррекции технологических операций;

- применение численного метода расчета электромагнитных полей ЭП с использованием зеркально-симметричных схем чувствительных элементов в НИОКР, что позволит в 2 раза повысить точность расчета основных характеристик электроемкостных преобразователей и сократить время в 2...3 раза.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Монографии:

1 – А. Джежора, А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск: РУП «Издательский дом «Белорусская наука», 2008. – 305с.

2 – А. Джежора, А.А. Электроемкостные методы контроля физических параметров жидких сред / А.А. Джежора, В.В. Рубаник //Перспективные технологии и методы контроля: монография; под общ. ред. академика В.В.Клубовича.– Витебск, 2009. - Гл.18. – С.485-515.

### Статьи:

3 – А. Джежора, А. А. Расчет электрических полей накладных измерительных конденсаторов в ортотропных средах / А. А. Джежора, В. В. Рубаник // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Серия физ.-техн.наук. – 2005. – № 1. – С. 82–86.

4 – А. Джежора, А.А. Зеркально-симметричные измерительные конденсаторы / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 4. – С. 110–114.

5 – А. Джежора, А.А. Математическая модель способа определения анизотропии с помощью электроемкостного зеркально-симметричного преобразователя /А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2007. – № 3. – С. 33–39.

6 – А. Джежора, А. А. Электроемкостные датчики с кольцевыми электродами / А.А. Джежора/ Вестник Белорусского национального технического университета. – 2007. – № 5. – С. 35–40.

7 – А. Джежора, А. А. Расчет математической модели экранированного накладного измерительного конденсатора /А.А.Джежора // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Серия физ.-техн.наук. – 2008. – № 1. – С. 63–67.

8 – А. Джежора, А. А. Расчет электрических полей зеркально-симметричных накладных измерительных конденсаторов / А.А. Джежора // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. – 2009. – № 9. –С. 86–91.

9 – А. Джежора, А.А. Контроль уровня топлива /А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. – 2010. – № 2. – С. 21-25.

10 – А. Джежора, А. А. Электроемкостной датчик уровня электропроводящей жидкости /А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В.К. Савчук, А.В. Кузьминич //Датчики и системы. –2008. – №12. – С.63–69.

11 – А. Джежора, А. А. Электроемкостной датчик уровня жидких сред /А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В.К. Савчук //Датчики и системы. – 2009. – №8. – С.91–93.

12 – А. Джежора, А.А. Моделирование накладных измерительных конденсаторов в присутствии заземленной плоскости / А.А. Джежора // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 2(49) – С.38-42.

13 – А. Джежора, А.А. Оптимизация конструкции накладного измерительного конденсатора // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2010. – № 5. – С. 43-48.

14 – А. Джежора, А. А. Модель накладного измерительного конденсатора / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 3. – С. 99-103.

15 – А. Джежора, А. А. Диэлькометрический метод определения влажности волокон / А. А. Джежора // Заводская лаборатория. – 2010. – Т.76, № 9. – С. 44 – 48.

16 – А. Джежора, А. А. Цилиндрический электроемкостной датчик уровня / А. А. Джежора // Датчики и системы. – 2010. – №9. – С.7-11.

17 – А. Джежора, А. А. Краевые эффекты на торцах электроемкостных датчиков / А. А. Джежора, В.В. Рубаник // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. – 2010. – № 9. – С.116-119.

18 – А. Андрушкевич, И. Е. Расчет емкостей проходных преобразователей, заполненных анизотропной слоистой средой / И. Е. Андрушкевич, А. А. Джежора, В.В. Клубович // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. - 1990. – № 5. – С. 52-58.

19 – А. Джежора, А. А. Анализ электрического поля проходного датчика / А.А. Джежора [и др.] // Известия Вузов. Сер. Технология текстильной промышленности. – 1989. - № 4. – С. 85-86.

20 – А. Джежора, А. А. Принципы проектирования накладных измерительных конденсаторов в присутствии заземленной плоскости / А.А. Джежора [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2(3). – С. 106-112.

21 – А. Джежора, А.А. Математическая модель зеркально-симметричного накладного измерительного конденсатора / А. А. Джежора // Научное приборостроение. – 2011. - Т. 21, № 4. – С. 127-133.

22 – А. Джежора, А. А. Диэлектрическая ортотропных материалов текстильной промышленности / А. А. Джежора, А.М. Науменко // Дефектоскопия. – 2011. - Т. 47, № 12. – С. 67 – 76.

23 – А. Джежора, А. А. Двухпараметровый датчик уровня жидкости / А. А. Джежора, В.В. Рубаник // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 56-61.

#### **Депонированные рукописи и статьи, опубликованные в сборниках**

24 – А. Джежора, А.А. Расчет напряженности электрического поля и емкости датчика измерения анизотропии диэлектрических свойств полимерных материалов / А.А. Джежора, В.Л. Шушкевич; Витебский технологический институт легкой промышленности. – Витебск. - Деп. в

ВИНИТИ 25.04.88, № 1549 – В88 // Журн. Весці АН БССР. Серыя фіз.-тэхн.наук. – 1989. -№1 – С. 117.

— 25 – А. Джежора, А.А. Расчет емкости датчика с симметричной системой плоских ленточных электродов / А. А. Джежора; Витебский технологический институт легкой промышленности. – Витебск. -Деп. в ВИНТИ 20.02.89, № 1089 – В89 // Журн. Весці АН БССР. Серыя фіз.-тэхн. наук. – 1990. - №1 – С. 110.

— 26 – А. Джежора, А.А. Расчет емкости трехжамного проходного преобразователя с симметричной системой плоских ленточных электродов / А.А. Джежора, А.А. Котов; Витебский технологический институт легкой промышленности. – Витебск. - Деп. в ВИНТИ 29.09.89, № 6082 – В89 // Журн. Весці АН БССР. Серыя фіз.-тэхн. наук. – 1990. -№2 – С. 119.

— 27 – А. Джежора, А.А. Конструкции датчиков для измерения анизотропии диэлектрических свойств тонких диэлектрических материалов / А.А. Джежора, В.В. Клубович; Витебский технологический институт легкой промышленности. – Витебск. -Деп. в ВИНТИ 28.06.88, № 5154 – В88// Журн. Весці АН БССР. Серыя фіз.-тэхн. наук. – 1989. -№3. – С. 114.

28 – А. Джежора, А. А. Расчет электростатической емкости проходного датчика, заполненного трехслойной и четырехслойной средами / А.А. Джежора, А. А. Котов // Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении: сб. статей / ВТИЛП. - Минск: Университетское, 1990. – С. 186–193.

29 – А. Андрушкевич, И. Е. Расчет электростатической емкости многосекционного проходного преобразователя, заполненного трехслойной средой / И. Е. Андрушкевич, А. А. Джежора// Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении: сборник статей / ВТИЛП. - Минск: Университетское, 1990. – С. 177–186.

30 – А. Жизневский, В. А. Расчет емкости трехжамного конденсатора с экраном / В. А. Жизневский, А. А. Джежора, И. Е. Андрушкевич // Совершенствование технологических процессов и организация производства машиностроения: сборник статей / ВТИЛП. - Минск: Университетское, 1993. - С.43-48.

### **Материалы конференций**

31 – А. Джежора, А. А. Проходные электроемкостные преобразователи / А. А. Джежора// Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономических и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: материалы 54 междунар. науч.-техн. конф., посвященной 80-летию БГПА, Минск, 2000г: в 10 ч. / БГПА; отв. за выпуск Ляшенко Л. Э. - Минск, 2000. - Ч. 3. - С. 38.

— 32 – А. Федосов, С. Н. Неразрушающий метод контроля и измерения влажности текстильных материалов / С.Н. Федосов, А.А. Джежора// Материалы юбилейной научно-технической межвузовской конференции.

Санкт-Петербург, 23-24 ноября 2000 г. / СПГУТД. - СПб., 2000. - Ч. 3. - С. 98-99.

—33 – А. Джежора, А.А. Прогнозирование прочностных свойств композиционных материалов / А. А. Джежора, В.В. Рубаник // Материалы XIУ Петербургских чтений по проблемы прочности, С– Петербург, 12 – 14 марта 2003 г. – С– Петербург. – С. 263.

— 34 – А. Джежора, А.А. Электроемкостной датчик контроля анизотропии физических свойств / А. А. Джежора, В.В. Рубаник // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: материалы ХУ междунар. науч.-техн. конф., Судак, май 2003г. – Судак, 2003. – С.65 - 66.

— 35 – А. Джежора, А.А. Математическая модель электроемкостного датчика контроля анизотропии физических свойств / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: материалы ХУI междунар. науч.-техн. конф., Судак, май 2004г. – Судак, 2004. – С. 91 - 92.

— 36 – А. Джежора, А.А. Расчет поля конденсатора для неразрушающего контроля анизотропии диэлектрических свойств тонких полимерных пленок / А.А. Джежора, В.В. Клубович, Э.В. Кондрацкий // Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля: материалы Всесоюз. науч.-техн. конф., Могилев, 1989. – Могилев, 1989. - Ч. 2.- С. 116.

— 37 – А. Джежора, А.А. Математические модели электроемкостных преобразователей, заполненных слоистыми ортотропными средами / А.А. Джежора// Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: ХУ междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20 - 22 окт. 2004г.– / Белорусско-Российский университет. - Могилев, 2004. - С. 95-96.

— 38 – А. Джежора, А.А. Прогнозирование прочностных свойств линейно-протяженных полимерных материалов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник// Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы ХУ междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20 - 22 окт. 2004г.– / Белорусско-Российский университет. - Могилев, 2004. - С. 99-100.

— 39 – А. Джежора, А.А. Электроемкостный метод исследования структуры линейно-протяженных полимерных материалов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник// Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы ХУ междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20 - 22 окт. 2004г.– / Белорусско-Российский университет. - Могилев, 2004. - С. 97-98.

— 40.– А. Джежора, А.А. Определение глубины зоны контроля электроемкостных преобразователей / А. А. Джежора, В.В. Рубаник // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической ди-



агностики: материалы XIII международной конференции, Ялта, 3-7 октября 2005г. – Ялта, 2005. – С.67 - 70.

— 41 – А. Джежора, А.А. Электроемкостные датчики уровня / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы XV междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 октября 2006 г. / Белорусско-Российский университет. - Могилев, 2006. - С. 209-210.

— 42 – А. Джежора, А.А. Компьютерные модели электроемкостных преобразователей / А.А. Джежора, Ю.А. Завацкий // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы XV междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 октября 2006 г. / Белорусско-Российский университет. - Могилев, 2006. – С. 299–300.

— 43 – А. Джежора, А.А. Зеркально-симметричные преобразователи для контроля структуры материалов/ А. А. Джежора, В.В. Рубаник // Физика прочности и пластичности материалов: материалы XVI международной конференции, Самара, 26-29 июня 2006. – Самара, 2006. - С.16.

— 44 – А. Джежора, А.А. Зеркально-симметричные кольцевые конденсаторы / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы V междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк, 25-26 мая 2006 г. – Новополоцк, 2006. - С.94.

— 45 – А. Джежора, А. А. Компланарные концентрические кольцевые конденсаторы / А. А. Джежора // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы XV междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 октября 2006 г. / Белорусско-Российский университет. - Могилев, 2006. - С. 131-132.

— 46 – А. Джежора, А.А. Общие закономерности контроля анизотропии ортотропных материалов/ А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы XV междунар. науч.-техн. конф, Минск, 6-8 июня 2006 г./ – Минск, 2006. – С 53-56.

— 47 – А. Джежора, А.А. Контроль влажности ортотропных материалов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: материалы VI-й междунар. науч.-техн. конф., Крым, Ялта, 26-28 сентября 2006 г. – Ялта, 2006. - С.45-47.

— 48 – А. Джежора, А.А. Определение ширины зоны контроля электроемкостных преобразователей / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XIV международной конф., Крым, Ялта, 26-28 сентября 2006 г. /Киев: «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» – Ялта, 2006. - С.29-31.

— 49 – А. Джежора, А.А. Экранирование электроемкостных преобразователей/ А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы

международной конф., Крым, Ялта, 26-28 сентября 2006 г. / Киев: «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» – Ялта, 2006. - С.32-34.

50 – А. Джежора, А. А. Разработка методики неразрушающего контроля ортотропных полимерных линейно-протяженных материалов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Актуальные проблемы прочности: материалы 46 Междун. конф., Витебск, 15 – 17 октября: в 2 ч. / Институт технической акустики, Витебский государственный технологический университет. - Витебск, 2007. - Ч. 1. - С. 332-333.

— 51 – А. Джежора, А.А. Трехзажимные датчики с электродами дугообразного сечения / А.А. Джежора // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XV межд. конф., Крым, Ялта, 1 – 5 октября. – Ялта, 2007. – С.3 – 6.

— 52 – А. Джежора, А.А. Электроемкостной уровнемер дизельного топлива / А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук, А.В. Кузьминич // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XIII междунар. конф., Крым, Ялта, 1 – 5 октября. - Ялта, 2007. - С. 6 – 7.

— 53 – А. Джежора, А.А. Накладные конденсаторы с дополнительным охранным электродом / А.А. Джежора // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XVI междунар. конф., Крым, Ялта - Киев, 1-5 октября 2008 г. / Укр. информ. центр «Наука. Техника и технологии» [и др.]; редкол.: Г.А. Бигус [и др.].– Ялта, 2008. – С.9-11.

— 54 – А. Джежора А.А. Электроемкостной уровнемер / А. А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук, В. К. // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XVI международной конф, Крым, Ялта - Киев, 1-5 октября 2008 г. / Укр. информ. центр «Наука. Техника и технологии» [и др.]; редкол.: Г.А. Бигус [и др.].– Ялта, 2008. – С.12-14.

— 55 – А. Джежора, А.А. Влияние геометрических размеров накладного измерительного конденсатора на его чувствительность / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы конф., Минск, 23-25 сентября 2009г./ Белорусск. госуд. технолог. университет. - Минск, 2009. - С. 133-134.

— 56 – А. Джежора, А.А. Оптимизация накладного измерительного конденсатора / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Международная Конференция Физиков Молдовы «КФМ-2009», 26 – 28 ноября. – Кишинев, 2009. – С.137.

57 – А. Джежора, А.А. Датчик уровня дизельного топлива / А.И. Кисина, Т.Е. Макаренко, А.Ю. Рахманов и др. // 42 научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета: материалы докладов, Витебск / УО "ВГТУ". - Витебск, 2009. - С. 40.

— 58 – А. Джежора, А.А. Влияние экрана подложки на емкость датчика / А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук // Современные методы и

приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 3 международной научно-технической конф., Могилев, 23-25 сентября 2009г./ ГУ ВПО "Белорусско-Российский ун-т". - Могилев, 2009. - С. 110-112.

59 – А. Джежора, А.А. Методы неразрушающего определения диэлектрической проницаемости ортотропных материалов / А.А. Джежора, А.П. Дмитриев // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 3 международной научно-технической конф., Могилев, 23-25 сентября 2009г./ ГУ ВПО "Белорусско-Российский ун-т". - Могилев, 2009. - С. 107-109.

60 – А. Джежора, А.А. Электроемкостной датчик уровня топлива / А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 3 международной научно-технической конф., Могилев, 23-25 сентября 2009г./ ГУ ВПО "Белорусско-Российский ун-т". - Могилев, 2009. - С. 171-172.

61 – А. Джежора, А.А. Влияние краевых эффектов на емкость датчика / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XVII междунар. конф., Ялта - Киев, 21-25 сентября 2009 г. / Укр. информ. центр «Наука. Техника и технологии» [и др.] ; редкол.: Г.А. Бигус [и др.]– Ялта, 2009. – С.51-52.

62 – А. Джежора, А.А. Контроль уровня жидких сред / А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В.К. Савчук // Контроль, стандартизация, контроль: теория и практика: материалы IX Междунар. научно-практ. конф.Крым, Ялта - Киев, 21-25 сентября 2009 г. / Укр. информ. центр «Наука. Техника и технологии» [и др.] ; редкол.: Г.А. Бигус [и др.]– Ялта, 2009. – С.48-50.

63 – А. Джежора, А.А. Влияние подложки на основные характеристики электроемкостного датчика / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Актуальные проблемы прочности: материалы 50-й междунар. научн.симпоз., Витебск, 27 сентября -01 октября 2010 / Институт технической акустики, Витебский государственный технологический университет. - Витебск, 2010. - С. 9–12.

64 – А. Джежора, А.А. Вопросы оптимизации накладных измерительных конденсаторов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Автоматизация технологических процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15 – 16 марта. – Минск, 2011. – С.140–141.

65 – А. Джежора, А.А. Метод зеркальных схем в задачах электростатики / А.А. Джежора, В.В. Рубаник. // Актуальные проблемы прочности: материалы 53 Междунар. научн. конф., Витебск, 2-5 октября 2012 г.: 2 ч. / Институт технической акустики, Витебский государственный технологический университет. – Витебск, 2012. – Ч.2. -С.181-182.

66 – А. Джежора, А.А. Краевые эффекты на торцах ленточных электродов электроемкостных преобразователей / А.А. Джежора, В.В. Ру-

банк, А.М. Науменко, В.К. Савчук // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы II междуна. научн.-техн. конф., Минск, 13 – 14 марта. – Минск, 2013. – С.47–48.

### **Тезисы докладов**

67 – А. Джежора, А. А. Исследование ортотропных материалов электроемкостными методами неразрушающего контроля / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Актуальные проблемы прочности: Структура и свойства перспективных металлов и сплавов: тезисы докладов 40 междуна. семинара, Великий Новгород, 30 сентября – 4 октября 2002г / Новгородский государственный университет имени Я. Мудрого. - Великий Новгород, 2002. - С.88.

68 – А. Джежора, А.А. Прогнозирование прочностных свойств композиционных материалов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Физика прочности и пластичности материалов: тезисы 15 Междуна. конф., Тольятти, 30 сент. – 3 окт. 2003г / Тольяттинский гос. ун-т. - Тольятти, 2003. - С. 112-113.

69 – А. Джежора, А.А. Электроемкостной метод исследования структуры композиционных материалов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Физика прочности и пластичности материалов: тезисы 15 Междуна. конф., Тольятти, 30 сент. – 3 окт. 2003г / Тольяттинский гос. ун-т. - Тольятти, 2003. - Ч.2. -С. 111-112.

70 – А. Джежора А.А. Трехзажимные преобразователи с охраняемыми электродами цилиндрической формы / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // XVI Петербургские чтения по проблеме прочности: материалы, Санкт – Петербург, 14 – 16 марта 2006г. – Санкт – Петербург, 2006. – С.39.

71 – А. Джежора, А.А.Зеркально-симметричные преобразователи для контроля структуры полимерных материалов / А.А. Джежора, В.В. Рубаник // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2007): тезисы междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 16 – 19 июля.2007г / ИММС НАН Беларуси. - Гомель, 2007. - С. 30.

72 – А. Джежора, А.А. Влияние полимерной подложки на емкость датчика / А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В.К. Савчук // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2009): тезисы междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 22-25 июня 2009 г/ ИММС НАН Беларуси. - Гомель, 2009. - С. 70-71.

### **Авторские свидетельства и патенты**

73 – А. Устройство для контроля шва ткани: а. с. 1381215 СССР, МКИ D 06 C 13/02 / В.Л. Шушкевич, А.А. Джежора, М.А. Шайдоров; Витебский тех. инстит. легк. пром. – № 4115070/31-12; заявл.04.06.86; опубл. 15.03.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 10. – С. 115.

74 – А. Способ контроля тонких диэлектрических материалов по толщине: а.с. СССР 1430859, МКИ4 G 01 N 27/22 / А.А. Джежора, В.Л.

Шушкевич, В.В. Щербаков; Витебский тех. инстит. легк. пром. – №4218335/31-25; заявл. 27.03.87; опубл. 15.10.88 // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 38. – С. 22.

75 – А. Способ измерения анизотропии свойств полимерных материалов: а. с. СССР 1549327, МКИ G 01 N 27/22 / А.А. Джежора, В.Л. Шушкевич, В.В. Щербаков Л.И. Кузнецова; Витебский тех. инстит. легк. пром. – № 4348154/31-25; заявл. 23.12.87 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 9. – С. 271.

76 – А. Устройство для снятия портновской мерки: а. с. 1607768 СССР, МКИ А 41 Н 1/04 / В.Л. Шушкевич, М.А. Пукшанский, М.А. Шайдорев, А.А. Джежора; Витебский тех. инстит. легк. пром. – № 468561/31-12; заявл. 29.12.88; опубл. 23.11.90 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 43. – С. 17.

77–А. Способ измерения рабочих емкостей плоских накладных измерительных конденсаторов: а. с. 16456476 СССР, МКИ5 G 01 N 27/22 / А.А. Джежора; Витебский тех. инстит. легк. пром. – № 4619332/21; заявл. 12.12.88; опубл. 15.06.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 22. – С. 177.

78– А. Способ определения структурной влаги в материалах с ортогональной анизотропией: а. с. 1778661 СССР, МКИ5 G 01 R 27/26 / А.А. Джежора; заявитель Витебский тех. инстит. легк. пром. – № 4878623/25; заявл. 29.10.90; опубл. 30.11.92 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 44. – С. 22.

79 – А. Способ определения глубины зоны контроля плоского накладного измерительного конденсатора: пат. 11238 Респ. Беларусь, МПК (2006) G01 R 27/26 / А. А. Джежора; заявитель Витебский гос. тех. ун-т. – № а 20060325; заявлено 10.04.2006; опубл.30.12.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. -№5. – С.132.

80 – А. Датчик измерения уровня жидкой или сыпучей среды: пат. 11930 Респ. Беларусь, МПК (2006) G 01 F 23/26, G 01 N 27/22 / А. А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук, А. В. Кузьминич; заявитель ГНУ «ИТА НАН Беларуси». – № а 20071045; заявлено 20.08.2007; опубл. 30.04.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. -№3. – С.155.

81 – А. Датчик измерения уровня жидкой или сыпучей среды: пат. 12674 Респ. Беларусь, МПК (2006) G 01 F 23/22, G 01 N 27/22 / А. А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук, А. В. Кузьминич; заявитель ГНУ «ИТА НАН Беларуси». – № а 20071060; заявлено 24.08.2007; опубл. 30.04.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. -№6. – С.117.

82 – А. Датчик измерения уровня электропроводящей жидкой среды: пат. 13036 Респ. Беларусь, МПК (2009) G 01 F 23/22, G 01 N 27/22 / А. А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук, А.В.Кузьминич; заявитель ГНУ «ИТА НАН Беларуси». – № а 20080333; заявл. 21.03.2008; опубл.

30.10.2009 / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. - №2. – С.125.

83 – А. Датчик измерения уровня жидкой среды: пат. № 14136 Респ. Беларусь, МПК (2009) G 01 F 23/22, G 01 N 27/22 / А. А. Джежора, В.В. Рубаник, В. К. Савчук; заявитель ГНУ «ИТА НАН Беларуси». – № а 20090044; заявл. 14.01.2009; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. -№1. – С.123.

84 – А. Конденсатор для определения анизотропии материала по диэлектрической проницаемости: пат. 16136 Респ. Беларусь, МПК (2009) G 01 K 27/26 / А. А. Джежора, А. М. Наumenко; заявитель Витебский гос. ун-т. – № а 20101026; заявл. 07.07.2010; опубл. 28.02.2012 //Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. -№4. – С.140.

Джежора Александр Александрович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО КОНТРОЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

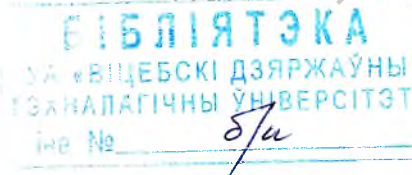
**Ключевые слова:** математическое моделирование, электроемкостные зеркально-симметричные преобразователи, анизотропия диэлектрических свойств.

**Цель работы:** – развитие физических основ и создание высокоэффективных методов и средств контроля анизотропных слоистых сред на основе электроемкостных зеркально-симметричных схем преобразователей, обладающих повышенными точностными характеристиками и расширяющих технические возможности НК.

**Методы исследования.** В работе использовалась теория функций комплексного переменного, метод непосредственного расчета напряженности электрического поля, метод зеркальных отображений, изотропизирующего преобразования координат, метод интегральных уравнений.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработаны научно-методологические положения необходимые при решении прямых и обратных задач электроемкостного контроля с целью обеспечения эффективного функционирования ЭП на основе численных расчетов электрических полей. Разработаны новые методы неразрушающего контроля состава и структуры материалов с ортогональной анизотропией, основанные на частотной зависимости анизотропии диэлектрических свойств материала от его влажности, позволившие устранить неоднозначности контроля, вызванные внешними факторами. Предложен метод определения глубины зоны контроля электроемкостных преобразователей, позволяющий повысить точность определения глубины зоны контроля МНИК в два раза. Разработаны конструкции датчиков контроля уровня жидких и сыпучих сред на основе применения МНИК, улучшающие их эксплуатационные характеристики.

**Область применения** – автоматизация технологических процессов с помощью ЭП в химической, нефтяной, авиационной, металлургической, машиностроительной и ряде других отраслей промышленности.



Джэжора Аляксандр Аляксандравіч

МЕТАДЫ І СРОДКІ ЭЛЕКТРАЕМІСТАСНАГА КАНТРОЛЮ  
АНІЗАТРОПНЫХ СЛАІСТЫХ АСЯРОДЗЯЎ НА АСНОВЕ ЛЮСТРА-  
СІМЕТРЫЧНЫХ СХЕМ ПЕРАЎТВАРАЛЬНІКАЎ

**Ключавыя словы:** матэматычнае мадэліраванне, электраёмістасныя люстра-сіметрычныя пераўтваральнікі, анізатрапія дыэлектрычных уласцівасцяў.

**Мэта работы:** - распрацоўка тэорыі і стварэнне новых метадык і алгарытмаў агульнага матэматычнага мадэліравання электрычных палёў электраёмістасных пераўтваральнікаў, распрацоўка на іх аснове новых метадаў і прылад неразбуральнага кантролю.

**Метады даследавання.** У працы выкарыстоўвалася тэорыя функцый камплекснага пераменнага, метады непасрэднага разліку напружанасці электрычнага поля, метады люстраных адлюстраванняў, ізатрапізіруюшчага пераўтварэння каардынат, метады інтэгральных ураўненняў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацаваны навукова-метадалагічныя становішчы, неабходныя пры рашэнні прамых і зваротных задач электраёмкаснага кантролю, з мэтай забеспячэння эфектыўнага функцыянавання ЭП на аснове лікавых разлікаў электрычных палёў.

Распрацаваны новыя метады неразбуральнага кантролю складу і структуры матэрыялаў з артаганальнай анізатрапіяй, заснаваныя на часціневай залежнасці анізатрапіі дыэлектрычных уласцівасцяў матэрыялу ад яго вільготнасці, якія дазвалялі ўхіліць неадназначнасці кантролю, выкліканыя вонкавымі фактарамі. Прапанаваны метады вызначэння глыбіні зоны кантролю электраёмкасных пераўтваральнікаў, які дазваляе павялічыць дакладнасць вызначэння глыбіні зоны кантролю МНІК у два разы. Распрацаваны канструкцыі датчыкаў кантролю узроўня вадкіх і сыпкіх асяроддзяў на аснове ўжывання МНІК, якія паляпшаюць іх эксплуатацыйныя характарыстыкі.

Вобласць ужывання - аўтаматызацыя тэхналагічных працэсаў з дапамогай ЭП у хімічнай, нафтавай, авіяцыйнай, металургічнай, машынабудуўнічай і шэрагу іншых галін прамысловасці.



JEZHORA ALIAKSANDR ALIAKSANDROVICH

**MEANS AND METHODS OF ELECTROCAPACITOR CONTROL OF ANISOTROPIC MATERIALS ON THE BASIS OF REFLECTION-SYMMETRIC SCHEMES OF TRANSDUCERS.**

**Keywords:** mathematical modeling, electrocapacitor reflection-symmetric transducers, anisotropy of the dielectric properties.

**The objective of the research** is development of the theory and creation of new highly effective methods and means of controlling of anisotropic and layered materials on the basis of reflection-symmetric schemes of transducers electric fields of electrocapacitor transducers that possess heightened accurate characteristics and develop technical abilities of TC.

**Methods used:** the theory of functions of complex variable, a method of direct calculation of intensity of electric field, a method of mirror displays, a method of isotropic transformations of co-ordinates, a method of the integral equations were developed in the work.

**The obtained results and their novelty.** There were developed scientific and methodological thesis that are necessary for solving direct and inverse tasks of electrocapacitor control in order to provide effective functioning of the ET on the basis of numerical calculations of the electric fields. There were worked out new methods of non-destructive control of the structure of materials with orthogonal anisotropy. These methods, allowing to eliminate the ambiguity of control due to external factors, are based on the frequency dependence of the anisotropy of dielectric properties of the material on its humidity. There was offered a method of determining the depth of the control zone of electrocapacitor transducers, allowing to increase the accuracy of determination of the depth control zone of FEF in two times. There were developed constructions of monitoring sensors of the level of liquid and dry materials on the basis of use of FEF improving their operational characteristics.

**Application field** – automation of technological processes with the help of ET in chemical, oil, aviation, metallurgical, machine-building and a number of other industries.



Витебский государственный технологический университет

---

Подписано в печать 04.11.2013 г. Формат бумаги 60х90 1/16.

Бумага офсетная №1. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. 1. 44, Уч. –изд. л. 3. Тираж 90 экз. Заказ 401

---

Отпечатано на ризографе ЦИТ УО «ВГТУ» Лицензия № 02330/0494384