

На правах рукописи

Семченков Алесь Александрович

**МЕТОД И СИСТЕМА
ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ МАММОГРАФИИ**

Специальность:

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена на кафедре биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель –
доктор технических наук, с.н.с. Калининченко Александр Николаевич.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Мамыкин Александр Иванович, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

кандидат технических наук, Матус Константин Михайлович, главный инженер ЗАО "МИКАРД-ЛАНА", Санкт-Петербург.

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП).

Защита диссертации состоится «27» марта 2013 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.09 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «___» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Садыкова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Среди разнообразных заболеваний молочной железы у женщин рак (РМЖ) представляет важнейшую проблему из-за высокой заболеваемости и смертности от него. В последние годы РМЖ прочно занимает первое место в структуре заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований женского населения России, а абсолютное число заболевших и умерших в 2005 году превысило 45 000 и 22 000 соответственно.

Примерно 30% женщин погибают от РМЖ в трудоспособном возрасте (до 55 лет). При этом большинство заболевших сами обнаруживали у себя опухоль, но уже на поздней стадии.

Ранняя диагностика злокачественных новообразований молочной железы существенно повышает эффективность лечения. Одной из основных составляющих ранней диагностики является реализация скрининговых программ. При этом диагностические методы скрининга должны быть безопасны, просты, недороги, высокочувствительны и специфичны.

Существующие методы диагностики не вполне удовлетворяют вышеперечисленным требованиям. Маммография, являющаяся на сегодняшний день основным методом диагностики рака молочной железы, во-первых, не безопасна, так как использует рентгеновское излучение, а во-вторых, требует дорогостоящего оборудования. Метод магнитно-резонансной томографии хотя и безопасен, но ещё более затратен. Ультразвуковое исследование обходится дешевле, но не обладает достаточной чувствительностью и специфичностью, особенно для лиц пожилого возраста.

Известно, что злокачественные опухоли молочной железы обладают электропроводностью, существенно отличающейся от электропроводности окружающих здоровых тканей. В развитых странах исследования по использованию метода электроимпедансной томографии (ЭИТ) для диагностики заболеваний молочной железы ведутся уже с 1980-х годов. Наличие большого количества иностранных и отечественных исследований по электроимпедансной маммографии, выполненных и опубликованных за последние 5 лет, позволяет сделать вывод о перспективности данного метода диагностики. Существующие электроимпедансные маммографы позволяют выявлять злокачественные опухоли молочной железы от 2 см в диаметре с чувствительностью до 76 %. Для

обнаружения раковых опухолей меньших размеров и повышения эффективности скрининговых программ, необходимо дальнейшее увеличение чувствительности метода электроимпедансной маммографии. Чувствительность электроимпедансной маммографии в основном определяется схемой сканирования (стратегией сбора данных), алгоритмом реконструкции проводимости и метрологическими характеристиками маммографа.

Целью данной работы является повышение чувствительности метода электроимпедансной маммографии и реализация предлагаемых технических решений в экспериментальном образце электроимпедансного маммографа.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**:

1. Разработка, компьютерное моделирование и экспериментальное исследование новых электроимпедансных методов выявления включений повышенной проводимости (опухолей).

2. Разработка математической модели пространственного распределения электрического потенциала в молочной железе при электроимпедансном сканировании для предварительного исследования новых методов выявления включений повышенной проводимости (опухолей).

3. Разработка физической модели распределения электропроводности молочной железы для экспериментального исследования методов выявления включений повышенной проводимости (опухолей).

4. Разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса электроимпедансного сканирования молочной железы для исследования разработанных методов выявления включений повышенной проводимости (опухолей).

Объектом исследования является система электроимпедансной маммографии.

Предметом исследования является методическое, инструментальное и алгоритмическое обеспечение системы.

Методы исследования.

Теоретическая часть исследования выполнена с применением методов математической статистики, электродинамики, теоретических основ электротехники и научной визуализации. В исследовании использовалась программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 10, программный пакет математического моделирования MATLAB 2010a, а также специально разработанный комплекс программ на базе платформы Microsoft .NET Framework 2.0.

Экспериментальные исследования проводились с использованием физической модели молочной железы, представляющей собой резервуар, наполненный солевым раствором, и экспериментального образца электроимпедансного сканера.

Научная новизна.

В процессе проведения исследования получены следующие новые научные результаты:

1. Метод электроимпедансного сканирования молочной железы. Научная новизна заключается в последовательном использовании нескольких (четырёх) общих токовых электродов, расположенных по разные стороны от исследуемого объекта, что позволяет повысить чувствительность системы к выявлению включений повышенной проводимости (опухолей).

2. Математическая модель объёмного распределения электрического потенциала в молочной железе в ходе электроимпедансного сканирования при наличии включения повышенной проводимости (имитация опухоли). Научная новизна заключается в использовании объёмной резисторной матрицы, что позволяет вычислять распределение электрического потенциала внутри и на границе исследуемого объекта для выбранной стратегии электроимпедансных измерений.

3. Методика оценки чувствительности схем электроимпедансного сканирования с точки зрения выявления неоднородности (злокачественной опухоли). Научная новизна заключается в предлагаемых критериях, отражающих характер распределения потенциалов на поверхности модели молочной железы, что позволяет проводить количественное сравнение чувствительности различных стратегий электроимпедансных измерений.

Практическую ценность работы составляют:

1. Новая схема сканирования с последовательным использованием нескольких (четырёх) общих токовых электродов, позволяющая повысить чувствительность метода электроимпедансной маммографии.

2. Математическая модель пространственного распределения электрического потенциала в молочной железе, позволяющая вычислять распределение электрических потенциалов внутри и на границе исследуемого объекта для выбранной стратегии электроимпедансных измерений.

3. Экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса электроимпедансной диагностики рака молочной железы, реализующий новую схему сканирования.

4. Программно-алгоритмическое обеспечение для автоматизации процесса математического и физического моделирования электроимпедансного сканирования молочной железы с визуализацией результатов.

Научные положения, выносимые на защиту:

Для повышения чувствительности электроимпедансной маммографии с точки зрения выявления включений повышенной проводимости (злокачественных опухолей) и получения исходных электроимпедансных изображений, точнее соответствующих сканируемым объектам, необходимо использовать схему сканирования с применением нескольких (четырех) последовательных измерений, полученных с помощью общих токовых электродов, расположенных по разные стороны от исследуемого объекта (молочной железы), и последующее суммирование измеренных данных.

Внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы были использованы для создания экспериментального образца аппаратно-программного комплекса «Электроимпедансный сканер» в ЗАО «Диамант». Также результаты работы внедрены в учебный процесс СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в форме материала для лекций и лабораторных работ по дисциплинам: «Методы обработки биомедицинских сигналов и данных», «Компьютерные технологии в медико-биологических исследованиях».

Апробация работы.

Основные теоретические и практические результаты диссертации были доложены и получили одобрение на следующих конференциях и симпозиумах: Международной конференции «Распознавание образов и анализ изображений» (РОАИ-11-2010, Санкт-Петербург); X Международном славянском Конгрессе по электростимуляции и клинической электрофизиологии сердца «КАРДИОСТИМ» (КАРДИОСТИМ 2012); XIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2010); I Международной молодежной конференции по интеллектуальным технологиям и системам (UNI-INTEL'2010); Всероссийской научной школе для молодежи «Биомедицинская инженерия» (БМИ-2010); ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2009 – 2011 гг.);

Научно-технической конференции НТО РЭС им. А. С. Попова (2009); научных семинарах кафедры Биотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 7 публикаций в трудах международных и российских научно-технических конференций и симпозиумов, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 81 наименование, среди которых 35 работ отечественных и 46 работ иностранных авторов.

Основная часть диссертации изложена на 156 страницах машинописного текста. Работа содержит 89 рисунков, 9 таблиц и 27 формул.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены научные положения, выносимые автором на защиту. Приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе формулируются основные медицинские и экономические требования к перспективным методам скрининга рака молочной железы (РМЖ). Анализируется состояние проблемы скрининга и диагностики РМЖ. Приведен краткий обзор методов и систем диагностики РМЖ, выделены их существенные недостатки и достоинства. Анализ существующих методов и систем диагностики РМЖ показал, что метод электроимпедансной маммографии является на сегодняшний день одним из наиболее перспективных методов для скрининга РМЖ.

В данной главе приводится обзор существующих систем электроимпедансной диагностики, рассмотрены проблемы и перспективы применения электроимпедансных изображений в медицинской практике. Показана необходимость повышения чувствительности и специфичности метода электроимпедансной маммографии. На основании проведенного анализа определяются цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели пространственного распределения электрического потенциала в молочной железе при электроимпедансном обследовании. Модель позволяет вычислять распределение электрических потенциалов внутри и на границе исследуемого объекта для выбранной стратегии электроимпедансных измерений при различных положениях включения повышенной проводимости (имитация злокачественной опухоли).

Компьютерная модель однородного объекта представляет собой объемную матрицу из 3700 резисторов, соединенных в форме цилиндра. Форма цилиндра выбрана исходя из того, что при наложении двухмерного массива жестко закреплённых электродов на поверхность молочной железы, последняя приобретает форму, близкую к цилиндрической. Фрагмент матрицы, состоящий из двух резисторных слоёв, представлен на рисунке 1.

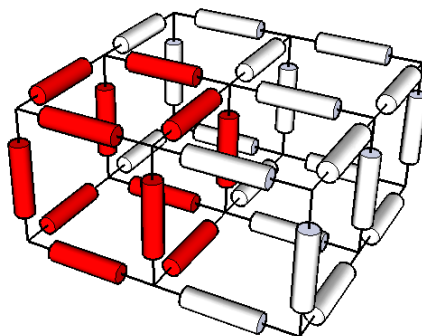


Рисунок 1 - Фрагмент резисторной модели молочной железы в трехмерном представлении. Темным цветом выделены резисторы с большей проводимостью, данный участок эквивалентен наличию патологии

Объемная матрица состоит из 6 основных резисторных слоёв, соединённых между собой промежуточными слоями резисторов. Верхний слой резисторной модели содержит 256 узловых соединений, к каждому из которых при помощи мультиплексора может подключаться положительный полюс источника тока. Все слои модели состоят из резисторов номиналом 25 Ом. Для имитации наличия опухоли во внутренних слоях изменяются номиналы резисторов, составляющих куб (рисунок 1). В данном исследовании резисторы, имитирующие опухоль, имели номинал $0,25 \cdot 10^{-5}$ Ом. Таким образом, разница в проводимости резисторов, имитирующих здоровые ткани (25 Ом), и резисторов, имитирующих опухоль ($0,25 \cdot 10^{-5}$ Ом), составила 10^7 раз. Положительный полюс источника подключается к одному из узлов верхнего резисторного слоя. Отрица-

тельный полюс источника тока может подключаться к различным узлам нижнего слоя резисторов с тем, чтобы имитировать прохождение тока из молочной железы в конечность (руку или ногу).

Полный расчет распределения потенциалов на поверхности исследуемого объекта включает в себя вычисление потенциалов в узлах верхнего слоя резисторов при последовательном подключении источника тока к каждому из 256 узлов верхнего слоя. Первый полный расчёт распределения потенциалов осуществляется для случая однородной среды (без включения большей проводимости), второй полный расчёт осуществляется для модели с включением большей проводимости.

Для визуализации и оценки результатов математического и физического моделирования были введены понятия дифференциальной карты и абсолютной суммарной разницы потенциалов.

Дифференциальная карта (карта разности) – цветовая или цифровая карта распределения абсолютной суммарной разницы между значениями электрических потенциалов, измеренными (или рассчитанными) на поверхности однородной модели, и значениями потенциалов, измеренными (или рассчитанными) на модели с включением повышенной проводимости (имитация опухоли). Дифференциальные карты позволяют оценить характер распределения и амплитуду изменений потенциалов на поверхности исследуемого объекта при появлении включения повышенной проводимости (имитация опухоли).

Абсолютная суммарная разница потенциалов ($S\varphi$) для каждой узловой точки графика вычисляется по следующей формуле:

$$S\varphi = \sum_{i=1}^N |\Delta\varphi_i|,$$

где N – количество токовых электродов; $|\Delta\varphi_i| = |\varphi_{ref} - \varphi_{tum}|$; φ_{ref} – потенциал данной точки, измеренный на однородной модели (без включения); φ_{tum} – потенциал данной точки, измеренный на модели с включением повышенной проводимости (имитация опухоли).

Как основной критерий оценки качества математического моделирования предложено использовать отклонение значения перепада абсолютной суммарной разницы потенциалов $D\varphi$ (рисунок 2 слева), полученного на

математической модели, от значения $D\varphi$, полученного на физической модели. Параметр $D\varphi$ характеризует чувствительность схемы сканирования.

$$D\varphi = S\varphi_{max} - M(S\varphi) ,$$

где $S\varphi_{max}$ – максимальное значение $S\varphi$ на дифференциальной карте; $M(S\varphi)$ – медиана значений $S\varphi$ дифференциальной карты.

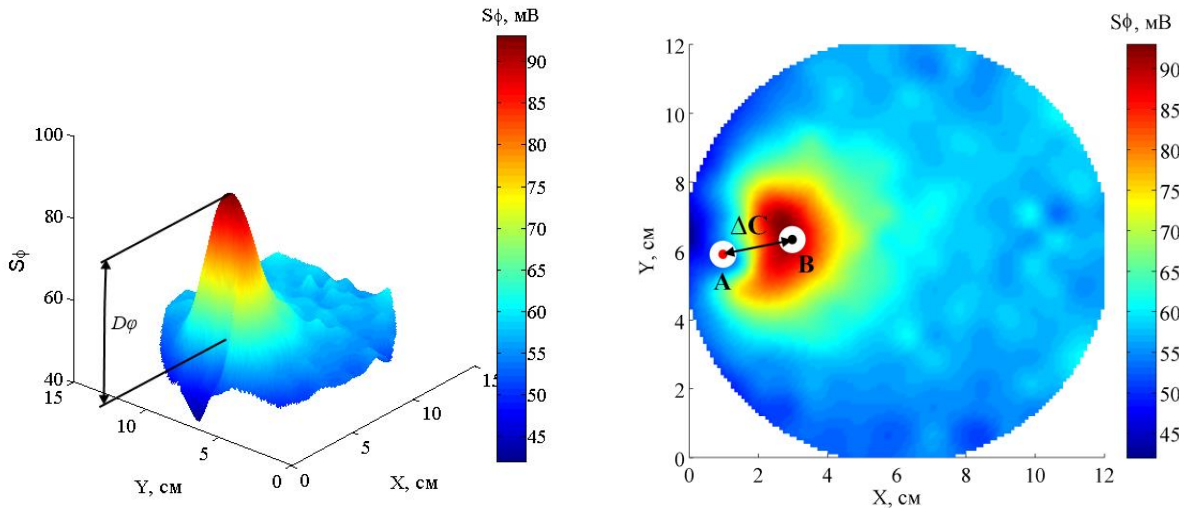


Рисунок 2 - Слева – схематичное изображение перепада суммарной разницы потенциалов $D\varphi$. Справа – смещение положения зоны максимального расхождения потенциалов ΔC (точка А – проекция центра включения, точка В – центр тяжести зоны максимального изменения потенциалов)

В качестве второго критерия для сравнения результатов моделирования было выбрано значение отклонения смещения положения зоны максимального расхождения потенциалов ΔC (рисунок 2 справа). ΔC – это расстояние между центром тяжести зоны максимального расхождения потенциалов и центром проекции включения большей проводимости на верхнюю поверхность модели. Центр тяжести зоны максимального изменения потенциалов – точка, координаты которой рассчитываются по следующим формулам:

$$X_{CG} = \sum(S\varphi_k \cdot x_k) / \sum S\varphi_k ,$$

$$Y_{CG} = \sum(S\varphi_k \cdot y_k) / \sum S\varphi_k ,$$

где $S\varphi$ – значение абсолютной суммарной разницы потенциалов в точке; x и y – координаты точки; k – номер текущей точки из зоны максимального изменения потенциалов.

Таким образом, ΔC характеризует точность соответствия исходного электроимпедансного изображения сканируемому объекту.

Проведено сопоставление результатов математического и физического моделирования распределения потенциалов при электроимпедансном сканировании молочной железы.

Отклонения значений абсолютного максимального перепада потенциалов $D\varphi$, вычисленных на математической модели, относительно измеренных значений получились следующими:

- а) максимальное отклонение (наихудший случай) – 6,79 мВ (17,2 %);
- б) среднее отклонение – 3,65 мВ (9,2 %);
- в) среднеквадратическое отклонение – 1,80 мВ (8,2 %).

Отклонения рассчитанных значений ΔC от результатов измерений имеют следующие значения:

- а) максимальное отклонение – 1,42 см;
- б) среднее отклонение – 0,72 см;
- в) среднеквадратическое отклонение – 0,45 см.

С помощью математической модели были исследованы 7 разработанных методов сканирования, отличающихся между собой различным взаимным расположением токовых и потенциальных электродов. В диссертации представлены два лучших новых метода.

Третья глава посвящена разработке и исследованию способов повышения чувствительности электроимпедансного сканирования молочной железы, показавших наилучшие результаты при математическом моделировании.

Схема сканирования, используемая в единственном сертифицированном в России электроимпедансном томографе, предполагает использование одного общего токового электрода (рисунок 3 А). В качестве альтернативы описанному выше способу сканирования были разработаны схемы сканирования, предполагающие использование нескольких (четырех) общих токовых электродов, которые могут использоваться как последовательно, так и параллельно. В частности, рассмотрена схема электроимпедансного сканирования, при которой общие токовые электроды предполагается устанавливать на конечности (рисунок 3 Б).

Экспериментальное исследование существующей и новых схем сканирования проводилось на физической модели с использованием включений большей проводимости (имитация опухоли) различных типов и размеров, а также при различных положениях включений. Физическая модель представляет собой бак, наполненный физиологическим раствором (удельное сопротивление $\rho = 0,7$

Ом·м), в который последовательно опускают предметы с большей электропроводностью. Таким образом, предмет, опущенный в воду, создает зону неоднородной проводимости.

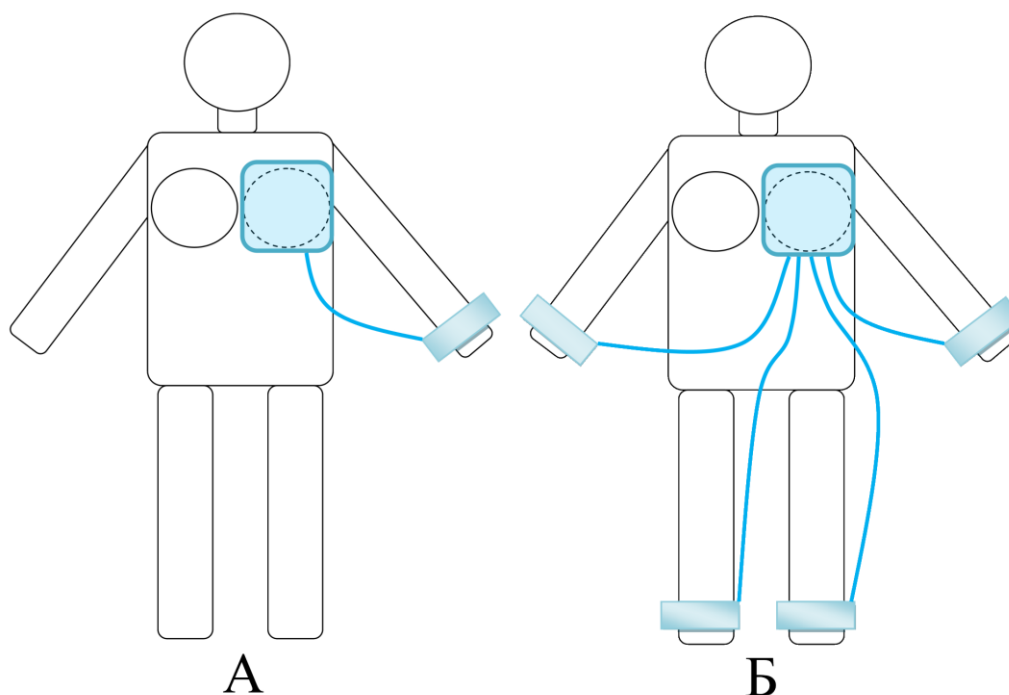


Рисунок 3 - А – схема сканирования с 1 общим токовым электродом.
Б – новая схема сканирования с 4 общими токовыми электродами

Типы и размеры включений:

- а) латунный цилиндр диаметром 16,5 и высотой 9 мм ($\rho = 0,07 \cdot 10^{-6}$ Ом·м);
- б) стальные шары с диаметрами 17, 7 и 5,5 мм ($\rho = 0,13 \cdot 10^{-6}$ Ом·м);
- в) феррит с размерами 16×16×4,5 мм (длина×ширина×высота) ($\rho = 0,5$ Ом·м).

Положения включений:

- а) включение расположено на 9 часах ближе к краю модели;
- б) включение расположено на 9 часах между центром и краем модели;
- в) включение расположено в центре;
- г) включение расположено на 7,5 часах между центром и краем модели.

На рисунке 4 представлен график изменения значения максимального перепада потенциалов, характеризующего чувствительность метода к включениям повышенной проводимости, в зависимости от выбранной схемы сканирования. По графику видно, что при любом из перечисленных положений включения повышенной проводимости максимальный перепад потенциалов $D\varphi$ будет получен при использовании 4 последовательных измерений с разным положе-

нием общего токового электрода. Аналогичные результаты получены в экспериментах с использованием стальных шаров с диаметрами от 5,5 до 17 мм. Показано, что предложенная схема сканирования позволяет повысить чувствительность метода электроимпедансной маммографии.

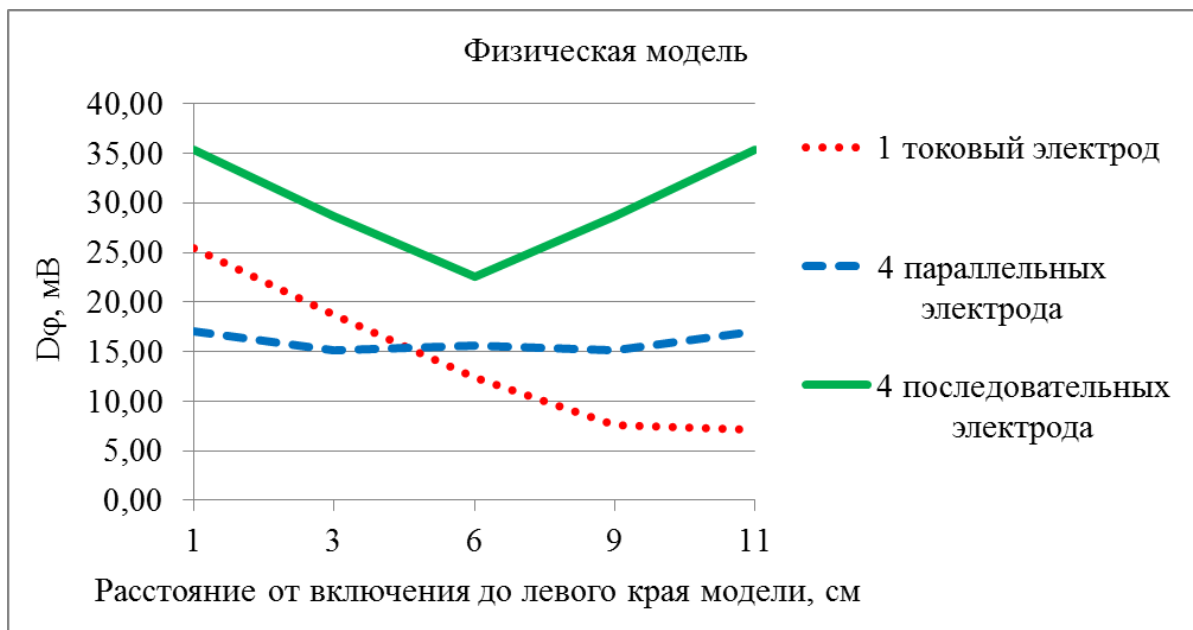


Рисунок 4 - График зависимости максимального перепада потенциалов $D\varphi$ от положения центра латунного цилиндра (включения повышенной проводимости), построенный для различных схем сканирования

Результаты измерения смещения ΔC в зависимости от выбранной схемы сканирования и положения включения повышенной проводимости представлены на рисунке 5. По графику видно, что смещение ΔC при использовании схемы сканирования с 4 общими токовыми электродами в интервале расстояний между включением и левым краем измерительной матрицы от 1 до 10 см на 0,01-1,5 см меньше, чем смещение при использовании одного токового электрода. Таким образом, показано, что схема сканирования с применением нескольких (четырех) последовательных измерений, полученных с помощью общих токовых электродов, расположенных по разные стороны от исследуемого объекта (молочной железы), позволяет получать исходные электроимпедансные изображения, точнее соответствующие сканируемым объектам.

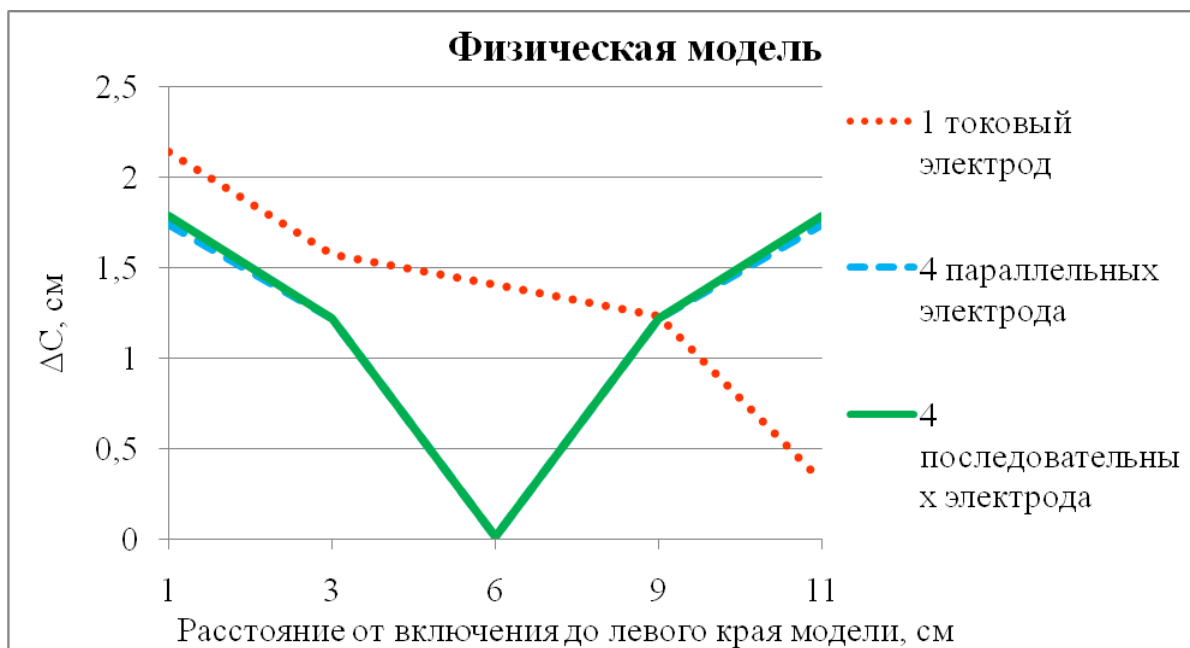


Рисунок 5 - График зависимости смещения ΔC от положения центра включения повышенной проводимости относительно левого края модели

Также в данной главе рассмотрены источники шумов электроимпедансного маммографа и предложен способ увеличения отношения сигнал/шум посредством усреднения измерений. Продемонстрирована возможность применения новой схемы сканирования с последовательным использованием 4 общих токовых электродов для обнаружения включений, удельная проводимость которых только в 1,4 превышает проводимость окружающей среды. В то же время известно, что отношение проводимостей, характерное для злокачественной опухоли и окружающих здоровых тканей молочной железы, обычно составляет 2:1. Ниже представлены изображения феррита ($\rho = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) в 0,8% растворе NaCl ($\rho = 0,7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), полученные при разном количестве усреднений. На правом изображении рисунка 6 отчетливо видно темное пятно в месте расположения феррита.

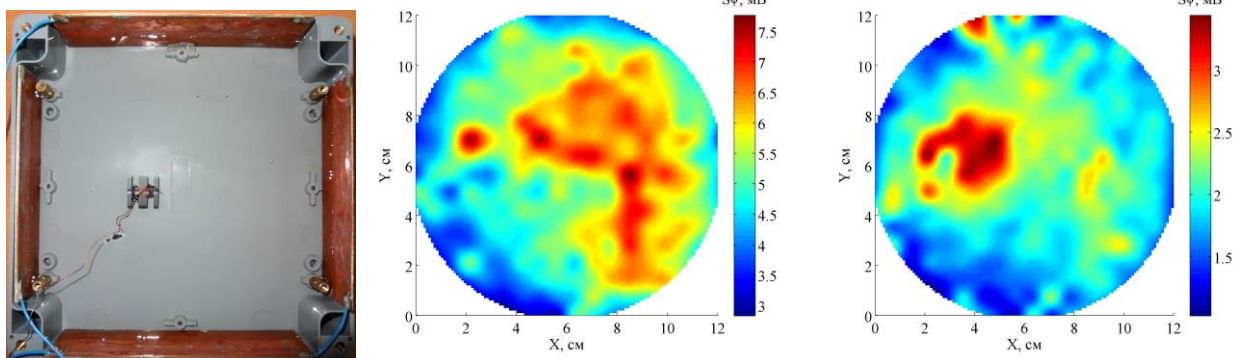


Рисунок 6 - Слева – фотография исследовательского стенда. Посередине – дифференциальная карта, полученная без усреднения измерений. Справа – дифференциальная карта, полученная при усреднении 10-и измерений

Четвертая глава посвящена аппаратно-программной реализации исследовательского комплекса. Описывается программная реализация трехмерной математической модели электроимпедансного обследования молочной железы. Представлено описание экспериментального образца электроимпедансного маммографа (рисунок 7), реализующего разработанную схему сканирования. Также описано программное обеспечение маммографа. Представлено техническое описание физической модели электроимпедансного обследования молочной железы.

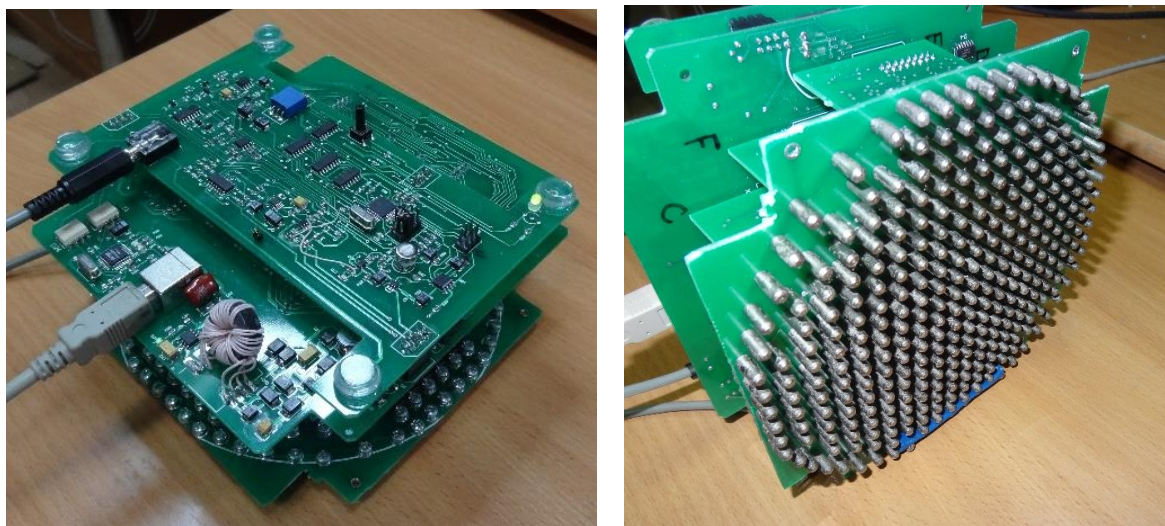


Рисунок 7 - Экспериментальный образец электроимпедансного маммографа

В заключении приводится обобщение основных научных и практических результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель пространственного распределения потенциала при электроимпедансном обследовании молочной железы, позволяющая имитировать различное положение включения повышенной проводимости (опухоли) и моделировать распределение потенциалов на поверхности объекта при различных схемах сканирования.

2. Предложена методика оценки чувствительности схем электроимпедансного сканирования с точки зрения выявления неоднородности (злокачественной опухоли), основанная на критериях, отражающих характер распределения потенциалов на поверхности модели молочной железы, и позволяющая сравнивать различные схемы сканирования с целью выявления наиболее подходящих из них для повышения чувствительности метода электроимпедансной маммографии.

3. Исследовано соответствие результатов математического и физического моделирования. Показана возможность применения разработанной математической модели пространственного распределения потенциала при электроимпедансном обследовании для предварительного сравнения чувствительности различных схем сканирования.

4. Разработана схема сканирования, предполагающая последовательное использование нескольких (четырех) общих токовых электродов и позволяющая повысить чувствительность метода электроимпедансной маммографии.

5. Показана возможность применения разработанной схемы сканирования для выявления локальной неоднородности с отношением проводимости включения и среды 1,4:1, при условии применения серии измерений с последующим усреднением. Данное отношение проводимостей характерно для злокачественной опухоли и окружающих здоровых тканей молочной железы, мало отличающихся по электропроводности.

6. Разработан экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса электроимпедансной диагностики рака молочной железы, реализующий новую схему сканирования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Семченков А. А. Использование модели на основе резисторной матрицы для исследования распределения электрического потенциала при электроимпедансной маммографии [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2010. – №11. – С. 59-63.
2. Семченков А. А. Метод электроимпедансной диагностики рака молочной железы [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – №1. – С. 4-7.
3. Семченков А.А. Моделирование работы метода электроимпедансной диагностики рака молочной железы [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», сер. “Биотехнические системы в медицине и экологии”. – 2012. – №3. – С. 60-64.

Свидетельства о государственной регистрации программ:

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа математического моделирования электроимпедансного сканирования органов человека» № 2012617004.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа обработки и визуализации электроимпедансных изображений органов человека» № 2012617003.

Публикации в других изданиях:

6. Семченков А. А. Электроимпедансная томография в диагностике рака молочной железы [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Сборник трудов 65-й научно-технической конференции СПбНТОРЭС им. А.С. Попова. – СПб. – 2010. – С. 318-319.
7. Семченков А. А. Анализ алгоритма электроимпедансной томографии с помощью геофизической математической модели [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Сборник докладов 13-й Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. – СПб. – 2010. – С. 135-138.
8. Семченков А. А. Применение математической модели для исследования показателей, определяющих глубину залегания опухоли в электроимпедансной маммографии / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Сборник докладов

1-й Международной молодежной конференции по интеллектуальным технологиям и системам (UNI-INTEL'2010). – СПб. – 2010. – С. 261-264.

9. Семченков А. А. Исследование распределения электрического потенциала при изменении размеров опухоли в электроимпедансной маммографии с помощью дискретной математической модели [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко, Т. В. Сергеев // Сборник докладов Всероссийской научной молодежной школы по биомедицинской инженерии «БМИ-2010». – СПб. – 2010. – С. 247-252.

10. Семченков А. А. Mathematical model for constructing electric potential distribution charts for electric impedance mammography (Математическая модель для построения карт распределения потенциала при электроимпедансной маммографии) [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Proceedings of 10th International conference «Pattern recognition and image analysis: new information technologies». – СПб. – 2010. – Volume 2. – С. 347-349.

11. Семченков А. А. Исследование метода электроимпедансной диагностики рака молочной железы [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко // Вестник аритмологии; прил. А. – 2012. – С. 130.

12. Семченков А. А. Способы повышения точности электроимпедансной маммографии [Текст] / А. А. Семченков, А. Н. Калиниченко, В.В. Илларионов // Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых 65-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ. – СПб. – 2012. – С. 213-216.