

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОЙ ТОМОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ ОТ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОДОВ

© 2024 г. Цянь Чжан^{1,*}, Хонг Мо³, Руксуэ Ли^{1,2}, Чэньхуа Лян^{1,2,**}, Цзюньхуа Луо⁴

¹Научно-технологический университет Гуанси,

Китай 545000 Лючжоу

²Ключевая лаборатория Гуанси по синтезу многомерной информации
для интеллектуальных транспортных средств, Китай

³Куньминский университет науки и технологий, Китай 650031 Куньмин

⁴Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

E-mail: *QianZhang283370482@163.com; **chenghua.liang@gxust.edu.cn

Поступила в редакцию 01.03.2024; после доработки 01.04.2024

Принята к публикации 05.04.2024

Электроемкостная томография (ЭЕТ) относится в визуальным методам неразрушающего контроля. Относительное распределение положения между электродами и дефектом влияет на точность восстановленного изображения. Для решения этой проблемы предлагается метод реконструкции изображения и алгоритм слияния изображений системы ЭСТ на основе вращающихся электродов. Сначала для восстановления экспериментальной модели применяются 4 алгоритма восстановления изображения, наилучшие результаты демонстрирует итерационный алгоритм Ландвебера, основанный на регуляризации Тихонова. Затем, вращая 12 электродов 4 раза, мы можем получить 5 наборов данных о емкости и получить 5 изображений. Наконец, результаты слияния могут быть получены путем выполнения адаптивного взвешенного слияния этих 5 изображений. Результаты показывают, что метод адаптивного взвешенного слияния изображений на основе вращения электродов улучшает качество реконструированных изображений и эффективно уменьшает артефакты.

Ключевые слова: адаптивное взвешенное слияние, электроемкостная томография (ЭЕТ), восстановление изображения, электроды вращения, неразрушающий контроль.

NONDESTRUCTIVE TESTING METHOD FOR ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY BASED ON IMAGE RECONSTRUCTION OF ROTATING ELECTRODES

© 2024 Qian Zhang^{1,*}, Hong Mo⁴, Ruxue Li^{1,2}, Chenghua Liang^{1,2,**}, Junhua Luo⁴

¹Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, 545000 China

²Guangxi Key Laboratory of Multidimensional Information Fusion for Intelligent Vehicles, China

³Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, 650031 China

⁴Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

E-mail: *QianZhang283370482@163.com; **chenghua.liang@gxust.edu.cn

The electrical capacitance tomography (ECT) is a visual nondestructive testing technology. The relative positional distribution between the electrodes and the phantom object affects the accuracy of the reconstructed image. To solve this problem, an image reconstruction method and image fusion algorithm of ECT system based on rotating electrodes are proposed. First, 4 image reconstruction algorithms are employed to reconstruct the experimental model, the Landweber iterative algorithm based on Tikhonov regularization presents the best performance. Then, by rotation the 12 electrodes 4 times, we can obtain 5 sets of capacitance data, and obtain 5 images. Finally, the fusion results can be obtained by performing the adaptive weighted fusion on these 5 images. Results show that the adaptive weighted image fusion method based on rotation electrodes improves the quality of reconstructed images and effectively reduces the artefacts.

Keywords: adaptive weighted fusion, electrical capacitance tomography (ECT), image reconstruction, rotation electrodes, nondestructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308224060025

1. ВВЕДЕНИЕ

Электроемкостная томография (ЭЕТ) — это неинвазивный метод контроля, который восстанавливает распределение диэлектрических констант в целевой области путем измерения значений емкости с помощью электродных датчиков. ЭЕТ широко используется в промышленности благодаря простой конструкции, высокой скорости получения изображения, низкой стоимости и высокой степени адаптируемости [1—7]. Точность и точность восстановления

изображения являются критическими вопросами в ЭСТ, которые остаются сложной проблемой даже после нескольких десятилетий исследований. Для решения этой проблемы были проведены обширные исследования алгоритмов реконструкции изображений [8—10]. Кроме того, для повышения точности измерения емкости постоянно модернизируются устройства сбора данных [11]. При восстановлении ЭЕТ-изображения увеличение или уменьшение количества электродов датчика существенно влияет на нечеткость восстановления изображения. Увеличение числа электродов может быть ограничено доступным пространством в области измерения и может привести к тому, что данные о емкости окажутся за пределами измеряемого диапазона. В предыдущих исследованиях Peng и др. [12] было показано, что увеличение числа электродов оказывает ограниченное влияние на улучшение качества реконструкции изображения. Помимо этого, увеличение числа электродов подразумевает необходимость использования более сложного и дорогостоящего оборудования для измерения емкости, что делает метод более дорогостоящим и лишает его преимущества в виде низкой стоимости. По этим причинам многие исследователи начали рассматривать новые пути решения проблемы количества электродов, т.е. увеличение количества измеряемых величин, а не числа электродов датчика.

Новые подходы повышают точность изображений за счет учета вращения электрического поля. Этот метод был использован для электрической импедансной томографии с вращающимся датчиком, управляемым шаговым двигателем [13]. Frounchi и Bazzazi [14] также предложили систему ЭЕТ с вращением 4 электродов, но они рассмотрели только использование цилиндрической модели и ЛОП-алгоритма для верификации метода. Murphy и York [15] предложили установить электроды на крыльчатке смесительного сосуда, чтобы улучшить измерение емкости между вращающимися электродами и неподвижными электродами на внутренней стенке сосуда. Позже Liu и др. [16] расширили этот метод на случай использования 16 электродов. Их результаты показывают, что при использовании датчика с 16 электродами, поворачиваемого 2-3 раза для измерения емкости, полученные результаты реконструкции несколько улучшаются. Кроме того, Wajman и др. [17] измеряли поток плотной среды, поворачивая 12 электродов 3 раза. При этом были достигнуты хорошие результаты в разделении поверхности седиментационного слоя и измерении концентрации твердых частиц. Хотя вышеупомянутые исследования смогли повысить точность восстанавливаемых изображений путем вращения электродов, совершенствование этих подходов ограничено. Кроме того, с помощью этого метода сложно добиться существенного уменьшения числа артефактов, возникающих на восстановленных изображениях при измерении на дефектах, что приводит к снижению точности восстановления изображений.

С этой целью предлагается новый подход к слиянию изображений на основе вращающихся электродов. В описанных выше исследованиях вращающихся электродов основной целью является получение большего количества измерений емкости для восстановления изображения путем вращения электродов для улучшения качества независимо восстановленных изображений. Однако новый метод, предложенный в данной работе, заключается в многократном вращении электрода, при котором каждый поворот электрода позволяет получить новый набор данных о емкости и последующем решении обратной задачи отдельно для каждого набора данных о емкости, чтобы получить несколько восстановленных изображений.

2. ПРИНЦИПЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЕТ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЭЛЕКТРОДАМИ

2.1. Процесс восстановления изображений на основе вращающихся электродов

На рис. 1 показан процесс регистрации данных и восстановления изображения для вращающихся 12 электродов. В то время как распределение диэлектрической проницаемости в измеряемой области остается неизменным, положение электродов меняется, и измеренные значения емкости между парами электродов изменяются. В этой системе проводится 66 независимых измерений емкости после полного 360-градусного электрического сканирования. В данной работе система ЭЕТ с 12 электродами имеет угол 30° между соседними электродами, который равномерно разделен на 5 частей (по 6° каждая), и 5 наборов данных о емкости получают после того, как электроды поворачиваются 4 раза. Однако когда 12 электродов поворачиваются 5 раз, то относительное положение между 12 электродами и дефектным объектом остается таким же, как и исходное положение. Основной принцип восстановления изображения заключается в том, что 5 восстановленных изображений получают путем решения обратной задачи для 5 наборов данных, а результаты слияния получают с помощью правил адаптивного взвешенного слияния изображений.

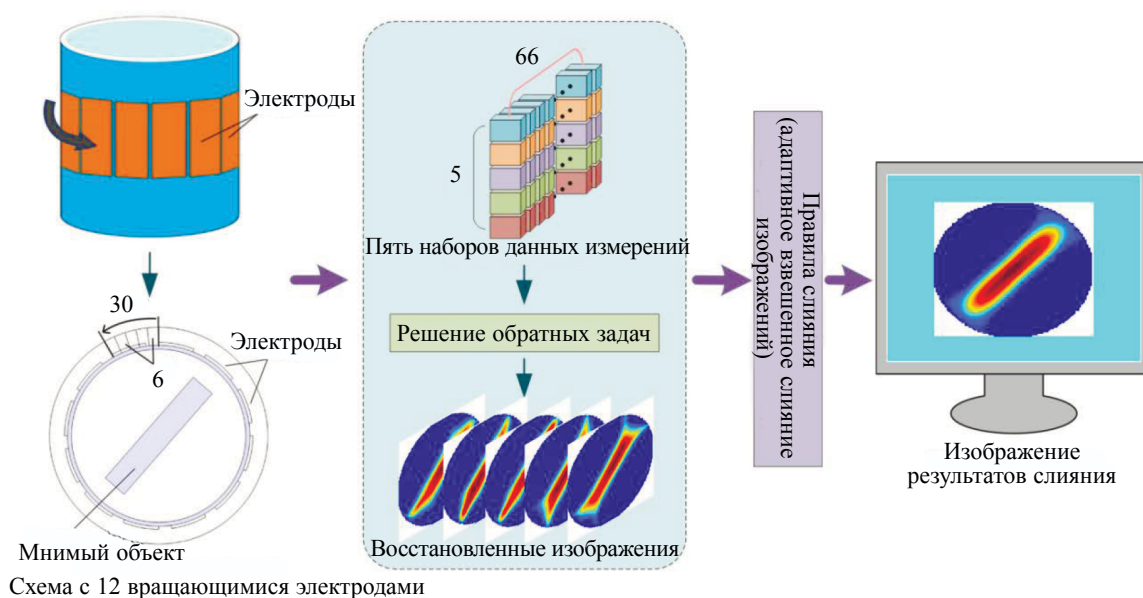


Рис. 1. Процесс получения данных и восстановления изображений для системы ЭЕТ с 12 вращающимися электродами.

2.2. Метод вращения электродов

В данной работе мы рассматриваем метод вращения с 12 электродами, а расчетная модель электрического поля для его вращения представлена на рис. 2. В центре области датчика электродов находится модель прямоугольного сечения с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. Вращение моделировалось путем изменения положения электродов с возбуждающим напряжением 1 В, что привело к появлению новых граничных условий в конечно-элементной модели [16]. Как показано на рис. 2, рис. 2а — случай отсутствия вращения электрода в исходном положении, рис. 2б — случай двухкратного изменения положения электрода и рис. 2в — случай четырехкратного изменения положения электрода. Обнаружено, что при четырехкратном изменении угла поворота емкостного датчика (6° каждый раз) между 5 восстановленными изображениями будут различия. Для проведения полноценного измерения один из электродов от E1 до E11 поочередно выбирается в качестве возбуждающего электрода, а остальные — в качестве детектирующих электродов, чтобы получить данные о емкости между всеми различными парами электродов. Затем поворот датчика с электродами осуществлялся 4 раза, и каждый раз данные о значении емкости регистрировались таким же образом, как и в первый раз. Таким образом, было получено 5 наборов данных о емкости.

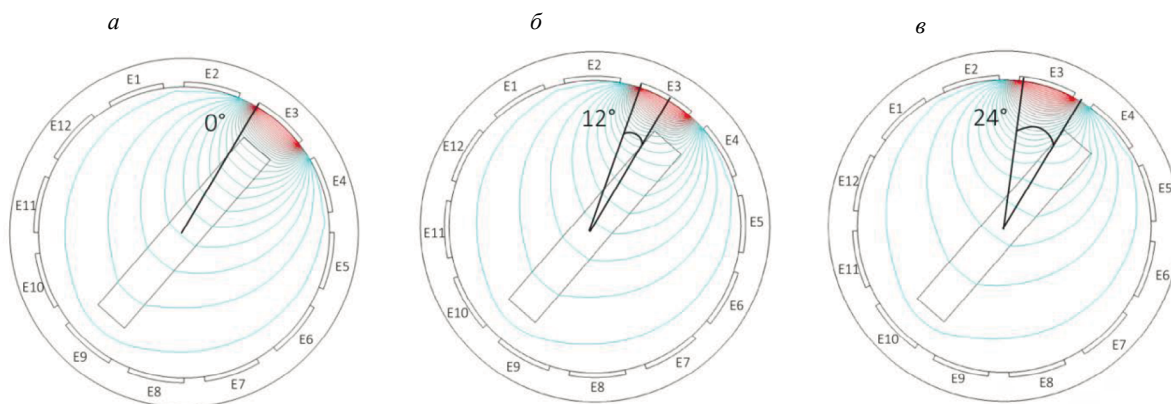


Рис. 2. Смоделированные изменения электрического поля, вызванные вращением датчика с 12 электродами около дефекта прямоугольной формы. E1 — возбуждающий электрод (1В). Начальное положение — 0° (а). Поворот электродов на 12° (б). Поворот электродов на 24° (в).

2.3. Разработка конечно-элементной модели

На рис. 3 показана сетка конечных элементов и расположение электродов. При использовании 12-электродной конструкции радиус $R1$ области визуализации составляет 100 мм, радиус $R2$ стенки трубы — 105 мм, а радиус $R3$ внешнего экрана — 112 мм. Все электроды датчика имеют одинаковый размер и равномерное расположение, а угол между соседними электродами составляет 30° . На рис. 3а показана конечно-элементная сеточная модель. Конечно-элементная модель обычно используется для прямого расчета, чтобы получить уникальное и стабильное решение обратной задачи. Метод конечных элементов (МКЭ) хорошо подходит для решения этой задачи для общих геометрий и неоднородных материалов. Более мелкая сетка обеспечивает как более высокую точность, так и большее пространственное разрешение. По окружности конечноэлементной модели расположено 12 элементов. Каждый элемент обозначает электрод. Рассматриваются данные измерений для 4 поворотов электрода, что соответствует 4 поворотам электрода на 6° , 12° , 18° и 24° соответственно. В методе конечных элементов процесс вращения электрода моделируется путем перемещения каждого электрода, определенного в модели, против часовой стрелки.

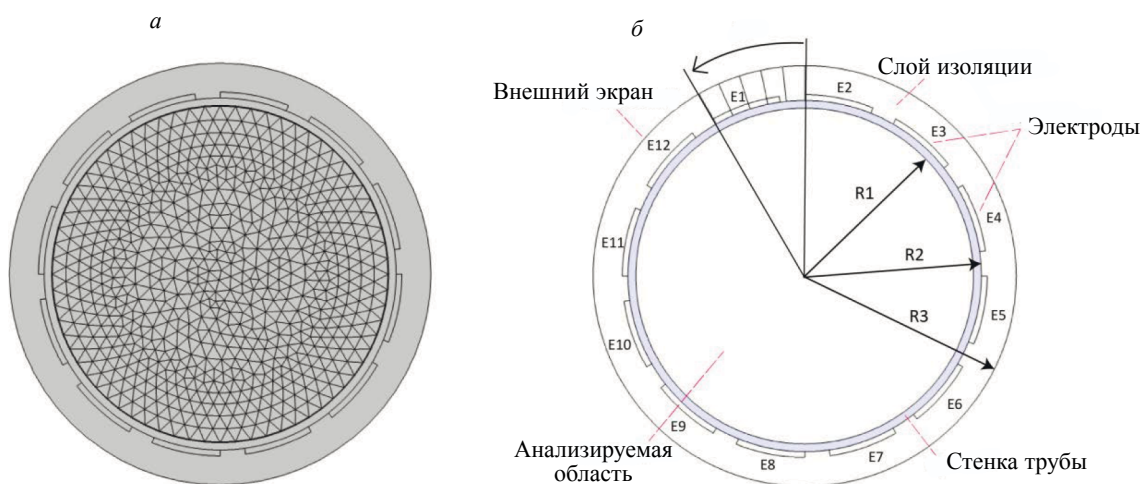


Рис. 3. Конструктивное расположение и сетка конечных элементов для преобразователя с 12 электродами.

3. АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СЛИЯНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Принципы ЭЕТ

В установке ЭЕТ связь между данными емкости C и измеренным участком распределения диэлектрической проницаемости может быть выражена выражением (1), предполагая, что влияние функции распределения диэлектрической проницаемости на функцию распределения чувствительности невелико:

$$\iint_D \varepsilon(x, y) \cdot S_i(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; D — область измерений; $\varepsilon(x, y)$ — функция распределения диэлектрической проницаемости и $S_i(x, y)$ — функция распределения чувствительности ёмкости между пластинами C_i .

В целом, прямая задача ЭЕТ может быть аппроксимирована линейной функцией и следующее уравнение может быть получено после дискретизации и нормировки уравнения (1):

$$G = S^T C, \quad (2)$$

где S — матрица чувствительности; G — нормированная функция распределения диэлектрической проницаемости; а C — нормированная емкость, величина которой может быть определен по формуле [18]:

$$C = \frac{C_m - C_l}{C_h - C_l}, \quad (3)$$

где C_m — реальная измеренная величина емкости; C_h и C_l — величины емкости, когда область измерений полностью заполнены материалами с высокой и низкой диэлектрическими проницаемостями соответственно.

Матрица чувствительности получается путем разбиения области изображения на мелкие пиксели и определения изменения емкости каждой пары электродов при небольшом изменении проницаемости каждого пикселя относительно пустого фона, т.е. область изображения заполнена материалом с низкой проницаемостью. Затем матрицу чувствительности можно легко рассчитать непосредственно по распределению потенциала, используя [19]:

$$S_{i,j}(x, y) = - \iint_{p(x,y)} \frac{\nabla \varphi_i(x, y)}{V_i} \cdot \frac{\nabla \varphi_j(x, y)}{V_j} dx dy, \quad (4)$$

где $S_{i,j}(x, y)$ — чувствительность между электродом i и электродом j в точке пикселя $p(x, y)$; $\varphi_i(x, y)$ и $\varphi_j(x, y)$ — соответствующие распределения потенциалов в области измерения датчика, когда напряжения возбуждения V_i и V_j приложены на электроды i и j соответственно, если они используются в качестве возбуждающих электродом. В данной работе исследуется разбиение области измерения датчика на сетку 88×88 для решения обратной задачи ЭЕТ. Электродные датчики поворачиваются таким образом, что соответствующие им матрицы чувствительности меняются. Из-за поворота 12-электродного датчика изменяется и его матрица чувствительности, соответствующая различным парам электродов. В 12-электродной системе ЭЕТ можно провести измерение 66 значений емкости между различными парами электродов, и в то же время существует 66 независимых матриц чувствительности. Когда 12 электродов поворачиваются на фиксированный угол, соответствующие 66 матриц чувствительности также поворачиваются. В данной работе матрица чувствительности из 12 электродов в начальном положении обозначается как S_1 . Когда 12 электродов поворачиваются 4 раза, их соответствующие матрицы чувствительности будут также поворачиваться 4 раза, и будут получены 4 матрицы чувствительности S_2, S_3, S_4 и S_5 .

Основная цель обратной задачи ЭЕТ — решить G на основе C и S , как показано в уравнении (5). Поскольку обратная матрица S часто не существует, вместо обратной матрицы обычно используется транспонирование матрицы S . Метод решения обратной задачи был базовый алгоритм линейного обратного проецирования (ЛОП):

$$G = S^T C. \quad (5)$$

3.2. Метод регуляризации Тихонова

Основная идея метода регуляризации Тихонова [20] заключается в преобразовании некорректной задачи в приближенную корректную задачу. В ЭКТ этот алгоритм широко используется для решения обратной задачи некорректной постановки. Его основная идея заключается в минимизации целевой функции:

$$\hat{G} = \min \|SG - C\|^2. \quad (6)$$

При аппроксимации исходной задачи приближенным решением можно ввести параметр α ($\alpha \geq 0$) для минимизации приближенного значения целевой функции:

$$\hat{G} = \min \|SG_\alpha - C\|^2 + \alpha \|G_\alpha\|^2, \quad (7)$$

где α — параметр регуляризации и его уравнение Эйлера выглядит как

$$(S^T \cdot S + \alpha I)G_\alpha = S^T \cdot C, \quad (8)$$

G_α — это решение, которое минимизирует целевую функцию:

$$G_\alpha = (S^T \cdot S + \alpha I)^{-1} S^T \cdot C, \quad (9)$$

где S — матрица чувствительности и I — единичная матрица.

В уравнении (9) после того, как значение параметра регуляризации определено, можно проводить восстановление ЭЕТ-изображения. Качество тихоновской регуляризации сильно зависит от α . Чаще всего его определяют специальным методом. Однако существуют некоторые подходы к выбору оптимального параметра, такие как перекрестные валидации или эмпирическая стратегия [21]. В нашем случае для простоты мы выбрали первое решение, т.е. эмпирическое определение.

3.3. Алгоритм регуляризации Ландвебера

Алгоритм Ландвебера — это метод, позволяющий эффективно решать обратную задачу с некорректной постановкой, который основан на методе крутого спуска и выбирает направление отрицательного градиента в качестве направления итерации. В данной работе используются два итерационных метода: итерационный метод, основанный на ЛОП-алгоритме [22], и итерационный метод, основанный на алгоритме Тихонова. Формулы конкретных итеративных алгоритмов могут быть выражены соответственно следующим образом:

$$\begin{cases} G_{k+1} = G_k + aS^T(C - SG_k) \\ G_0 = S^T C \end{cases}, \quad (10)$$

где a — количество итераций; G_k — нормализованное значение оттенков серого цвета изображения при k итерациях; G_0 — начальная величина шкалы изображения в оттенках серого, полученная с помощью ЛОП-алгоритма:

$$\begin{cases} G_{k+1} = G_k + aS^T(C - SG_k) \\ G_0 = (S^T S + \alpha I)^{-1} S^T C \end{cases}, \quad (11)$$

где α — параметр регуляризации, в данном уравнении G_0 — начальная величина шкалы изображения в оттенках серого, полученная с помощью алгоритма Тихонова [23, 24].

3.4. Метод адаптивного взвешенного слияния на основе изображений вращающихся электродов

Схема вращения электрода в данной работе показана на рис. 1, где электродный датчик проворачивается 4 раза на угол 6° каждый раз. С помощью этого метода можно получить 5 различных наборов данных о емкости, а затем 5 различных изображений путем решения обратных задач соответственно. Затем для слияния изображений используется метод адаптивного взвешивания, который определяет весовой коэффициент слияния изображений в соответствии с распределением энергии областей для каждого изображения.

Шаг 1. Во-первых, 5 восстановленных изображений, полученных с помощью ЛТ-алгоритма, преобразуются в одномерные векторы, обозначаемые как G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 , а затем рассчитывается ковариационная матрица X :

$$X = COV([G_1, G_2, G_3, G_4, G_5]). \quad (12)$$

Шаг 2. Согласно характеристическому уравнению $|\lambda I - X| = 0$, получают собственные значения $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$ и собственный вектор $(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5)$ матрицы X .

Шаг 3. Выбирается максимум собственных значений $\lambda_i = \max(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$, а затем рассчитываются весовые коэффициенты $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ и θ_5 :

$$\theta_1 = \frac{e_i(1,i)}{\sum_{j=1}^5 e(j,i)}, \quad \theta_2 = \frac{e_i(2,i)}{\sum_{j=1}^5 e(j,i)}, \quad \dots, \quad \theta_5 = \frac{e_i(5,i)}{\sum_{j=1}^5 e(j,i)}, \quad (13)$$

где i принимает значения в диапазоне от 1 до 5; e_i — собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению λ_i :

$$G_f(x, y) = \sum_{i=1}^5 \theta_i G_i(x, y). \quad (14)$$

Изображение слияния $G_f(x, y)$ может быть получено по (14), где $G_i(x, y)$ — изображения, полученные вращением электродов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Результаты применения алгоритмов восстановления изображения

Для того чтобы выбрать оптимальный алгоритм восстановления изображения при анализе метода слияния изображений вращающихся электродов, были проанализированы характеристики восстановления изображений ЛОП-алгоритма, алгоритма Тихонова, алгоритма Ландвебера и алгоритма Ландвебера, основанного на Тихонове (ЛТ-алгоритм). Анализ восстановления изображений был реализован в программе MATLAB, а тестирование изображений проводилось на 4 моделях, представленных на рис. 4.

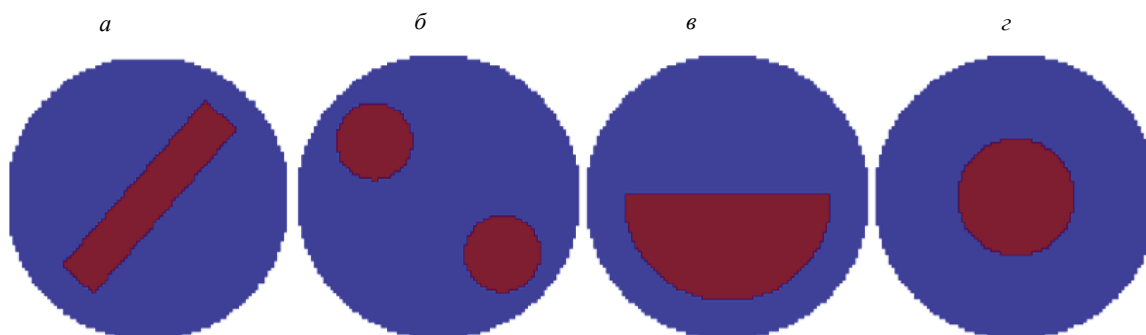


Рис. 4. Распределение диэлектрической проницаемости дефектов в виде: прямоугольника (а); двух окружностей (б); полукруга (в); круга (г).

Для алгоритма Ландвебера величина шага итерации равна 10, параметр регуляризации алгоритма Тихонова установлен на 0,25. Для ЛТ-алгоритма размер шага итерации и параметр регуляризации установлены на 10 и 0,18 соответственно. Затем область измерения 4 дефектов, из-за которых перераспределяется диэлектрическая проницаемость (дефект А, дефект В, дефект С и дефект D) была разделена на $88 \times 88 = 7744$ пикселей. Материал с низкой диэлектрической проницаемостью в области измерения датчика был установлен на воздух со значением 1,0. В качестве материала с высокой проницаемостью использовалось дерево со значением 3,0. Результаты восстановления изображений показаны на рис. 5.

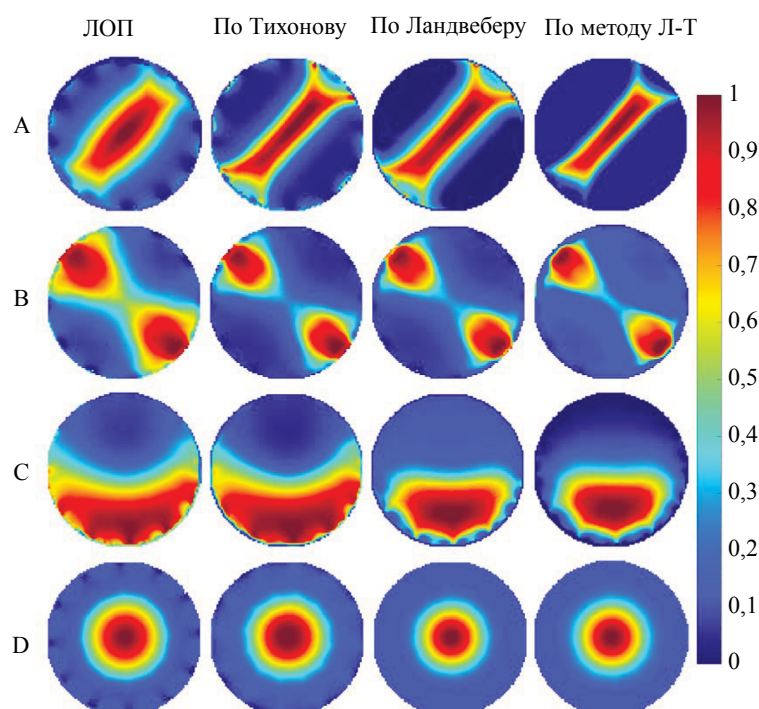


Рис. 5. Результаты восстановления изображения изображений для четырех алгоритмов.

Для оценки качества восстановленных изображений с помощью вышеуказанных 4 алгоритмов в качестве параметров оценки используются искажение изображения и коэффициент корреляции изображения. Формулы для расчета искажения изображения E_r и коэффициента корреляции p приведены в (15) и (16) соответственно:

$$E_r = \frac{\|\hat{g} - g\|}{\|g\|}; \quad (15)$$

$$p = \frac{\sum_{i=1}^P (g_i - \bar{g})(\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^P (g_i - \bar{g})^2 \sum_{i=1}^P (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2}}, \quad (16)$$

где $\hat{g}$ — рассчитанное распределение диэлектрической проницаемости; g — истинное распределение диэлектрической проницаемости; g_i и $\hat{g}_i$ — i -компоненты g и $\hat{g}$ соответственно; $\bar{g}$ и $\bar{\hat{g}}$ — средние величины g и $\hat{g}$ соответственно; P — количество пикселей в области отображения. С помощью уравнений можно обнаружить, что, чем меньше E_r и чем больше p , тем лучше качество восстановления изображений посредством ЭЕТ.

Искажения изображений и коэффициенты корреляции изображений для 4 различных алгоритмов восстановления изображений приведены в табл. 1 и табл. 2 соответственно. Результаты экспериментов показывают, что при восстановлении изображения по ЛОП-алгоритму возникают ошибки, связанные со значительным сглаживанием и размытием краев, а искажение изображений велико и максимальное значение составляет 31,4 %. По сравнению с ЛОП-алгоритмом, искажение изображения по алгоритму Тихонова уменьшилось, но эти значения все еще велики (29,2 %) для дефекта С, имеются серьезные артефакты. Алгоритмы Ландвебера и ЛТ-алгоритма дают гораздо лучшие результаты восстановления изображений, чем два предыдущих алгоритма. Из этих результатов следует, что ЛТ-алгоритм обеспечивает лучшее качество восстановления с относительно небольшим количеством артефактов, чем алгоритм Ландвебера, когда они используют одинаковый шаг итерации, равный 10. В данной работе решено выбрать ЛТ-алгоритм для восстановления изображения вращающегося электрода и анализа слияния изображений.

Таблица 1

Искажения изображений E_r , %

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
ЛОП	31,4	29,8	30,1	22,4
Метод Тихонова	25,4	23,1	29,2	21,2
Метода Ландвебера	23,6	21,7	18,9	14,2
Метод ЛТ	17,1	18,8	17,4	13,6

Таблица 2

Коэффициент корреляции изображения $p(|p| \leq 1)$

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
ЛОП	0,566	0,584	0,577	0,769
Метод Тихонова	0,693	0,715	0,612	0,746
Метода Ландвебера	0,742	0,764	0,807	0,904
Метод ЛТ	0,862	0,822	0,834	0,923

4.2. Эксперимент по моделированию без шума

Предложенный метод вращения датчика с 12 электродами показан на рис. 2. Пять массивов данных о емкости могут быть получены при повороте электродов 4 раза, как показано на рис. 6.

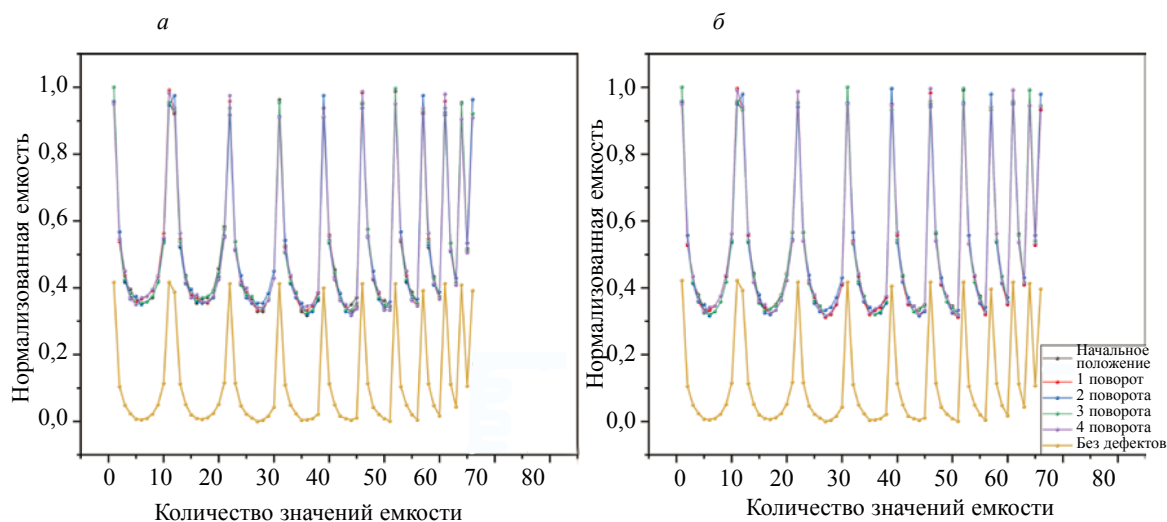


Рис. 6. График представляет собой 5 наборов данных о емкости без шумов и данных о емкости при заполнении материалом с низкой проницаемостью (без дефекта): данные емкости с дефектом А (а), данные емкости с дефектом D (б).

Затем обратная задача решается с помощью ЛТ-алгоритма и получается 5 различных восстановленных изображений. Адаптивный взвешенный метод используется для слияния 5 результатов, восстановленные изображения показаны на рис. 7. В табл. 3 и табл. 4 приведены искажения изображения и коэффициент корреляции изображения для восстановленных изображений в исходном положении и результатов адаптивного взвешенного слияния соответственно.

На рис. 6а, б представлены пять наборов бесшумных нормализованных данных емкости для дефекта А (прямоугольник), дефекта D (круг) и нормализованных данных емкости без дефекта (при заполнении материалом с низкой диэлектрической проницаемостью), соответственно. Как видно из рисунка, 5 наборов данных, полученных при вращении электродов, близки, но не идентичны, что приводит к различиям у 5 восстановленных изображений.

На рис. 7 показано, что в исходном положении, когда оба типа дефектов А и В находятся непосредственно напротив пары электродов, восстановленное изображение является

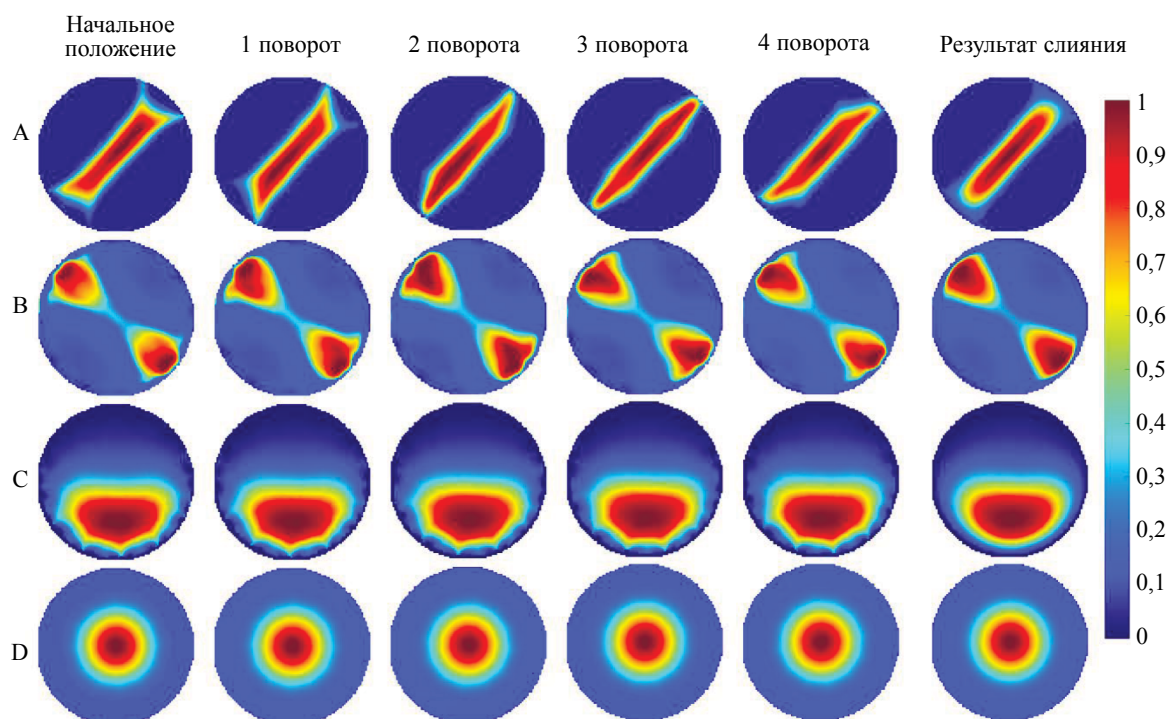


Рис. 7. Результаты восстановления изображений в случае отсутствия шумов при использовании метода вращающихся электродов.

Таблица 3

Искажение изображения E , в исходном положении без шума и изображения слияния, %

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	17,1	18,8	17,4	13,6
Результаты слияния	13,4	15,6	12,3	12,9

Таблица 4

Коэффициенты корреляции изображений r бесшумных изображений в исходном положении и изображений слияния ($|r| \leq 1$)

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	0,862	0,822	0,834	0,923
Результаты слияния	0,938	0,866	0,934	0,936

наилучшим. Однако найти оптимальное положение электродов во время реальных измерений практически невозможно. Восстановленные изображения дефектов А и В при первом и четвертом поворотах почти симметричны. Согласно результатам эксперимента, на восстановленных изображениях дефектов А и В наблюдаются регулярные артефакты при изменении положения электродов во время их вращения. Из распределения электрического поля вращающихся электродов на рис. 2 видно, что прямоугольный дефект имеет наибольшее измеренное значение для пар электродов ЕЗ—Е9, когда прямоугольный дефект находится напротив пары электродов. При обратном вращении электродов значения емкости электродных пар ЕЗ—Е9 постепенно уменьшаются, а значения емкости электродных пар Е4—Е10 постепенно увеличиваются. Когда прямоугольный дефект расположен в середине электродных пар ЕЗ—Е9 и Е4—Е10 (поворот электродов на 15°), данные по емкости, измеренные для обеих электродных пар, практически одинаковы. Таким образом, разброс измерений между соседними парами электродов является основной причиной артефактов на дефектах А и В. На восстановленном изображении дефекта С артефакты наблюдаются только по краям вблизи электродов при всех вращениях. Для сравнения восстановленных изображений дефектов А, В и С в качестве контрольной группы используется дефект D. Дефект D (круг) является полностью симметричной моделью, независимо от того, как вращаются электроды, влияние положения электродов на этот дефект невелико, и можно получить пять приблизительно одинаковых восстановленных изображений. Из рис. 7 и табл. 3 и 4 видно, что качество восстановленных изображений после адаптивного взвешенного слияния улучшается для выбранных 4 дефектов. Из-за низкой чувствительности центральной области датчика качество восстановленного изображения дефекта D после адаптивного взвешенного слияния улучшается незначительно.

4.3. Модельное исследование с учетом шумов

Для оценки эффективности адаптивного метода слияния взвешенных изображений на основе вращающихся электродов в случае наличия помех 10 % шума емкости были заданы для моделирования измеряемой емкости, эти данные представлены на рис. 8. Видно, что разница между 5 наборами данных емкости с шумовым загрязнением увеличивается.

Восстановленные изображения по методу ЛТ-алгоритма и результаты слияния показаны на рис. 9, значения соответствующих параметров E , и r перечислены в табл. 5 и 6. Результаты экспериментов показывают, что качество восстановленных изображений при использовании ЛТ-алгоритма уменьшается и больше артефактов проявляются в случае с 10%-шумом. Однако после слияния восстановленных изображений количество артефактов уменьшается и качество изображений повышается. Метод слияния изображений, основанный на вращающихся электродах, обладает высокой способностью подавления шумов, смягчает некорректность постановки задачи и позволяет получить лучшую точность определения формы.

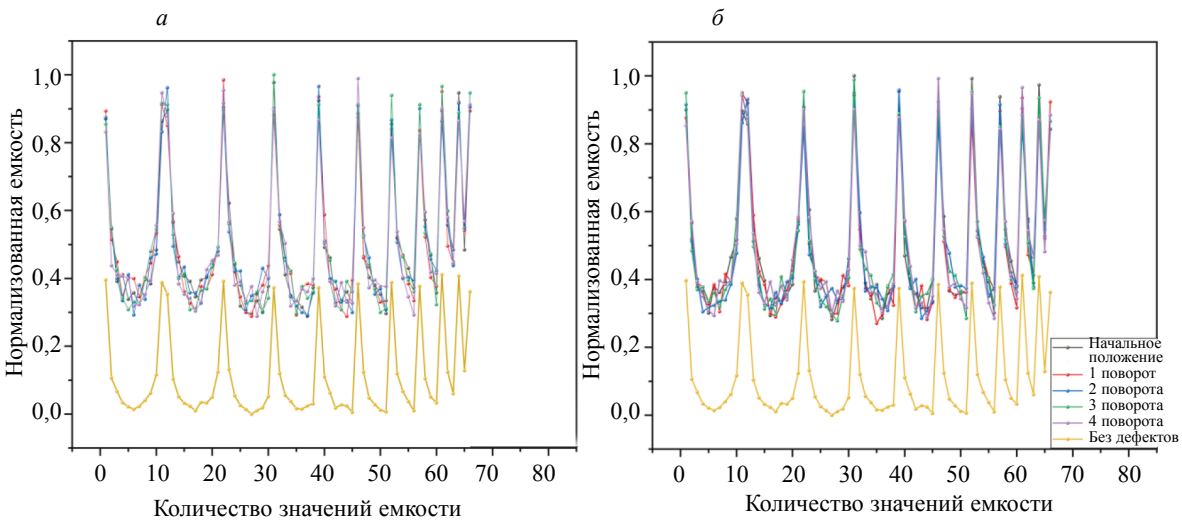


Рис. 8. График состоит из 5 наборов данных емкости при наличии шумов и данных емкости при заполнении материалом с низкой проникаемостью (без дефекта): данные о емкости с дефектом А с 10 % шумом (а); данные о емкости с дефектом D с 10 % шумом (б).

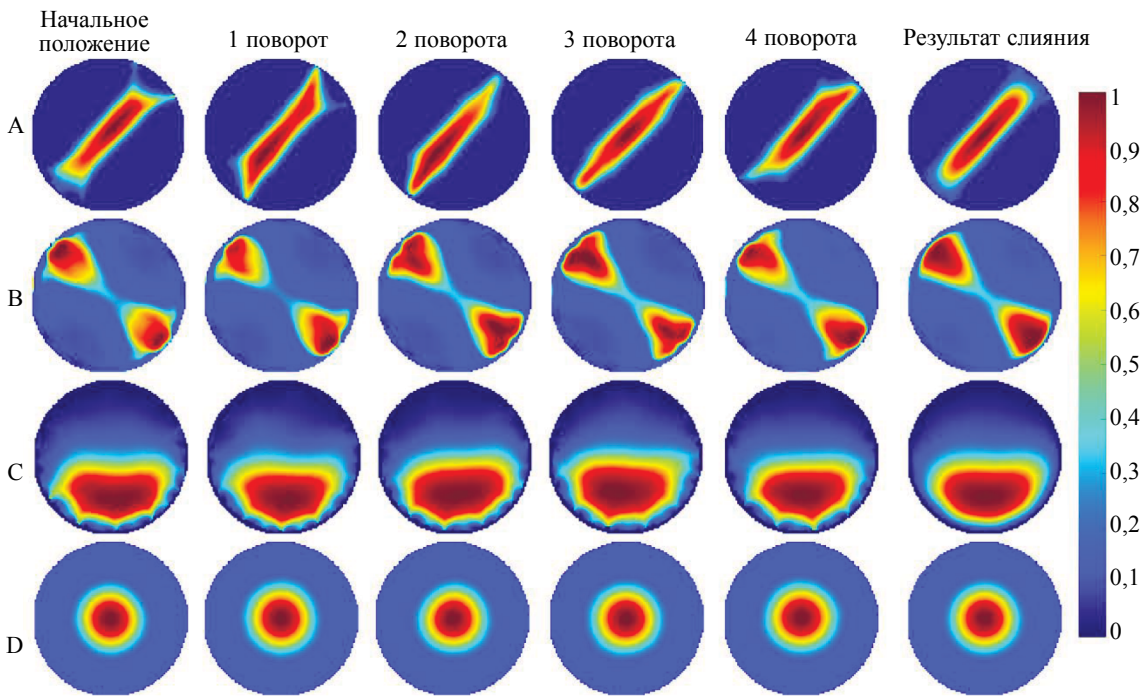


Рис. 9. Результаты восстановления изображений в случае зашумления изображения при использовании метода вращающихся электродов.

Таблица 5

Искажение изображений E_c , загрязненных шумом, в исходном положении и изображений слияния, %				
	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	18,3	19,2	18,8	14,1
Результаты слияния	14,3	15,9	12,6	13,3

Коэффициенты корреляции изображений p , загрязненных шумом, в исходном положении и изображений слияния ($|p| \leq 1$)

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	0,834	0,813	0,815	0,914
Результаты слияния	0,921	0,852	0,928	0,931

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предлагается метод неразрушающего контроля для томографии электрической емкости, основанный на восстановлении изображений вращающихся электродов. Пять наборов данных о емкости можно получить, поворачивая электроды 4 раза (по 6° каждый раз). Были использованы четыре алгоритма восстановления изображений, и наилучшие результаты восстановления показал итерационный алгоритм Ландвебера на основе метода Тихонова. С помощью этого алгоритма было получено пять восстановленных изображений вращающихся электродов. После этого пять изображений были обработаны в соответствии с правилом адаптивного взвешенного слияния.

Сравнивая полученное после слияния изображение с изображением в исходном положении, мы видим, что качество изображения значительно улучшилось, а большинство артефактов уменьшилось. Среди них наиболее значительно улучшилось качество восстановленного изображения дефекта С E_r , уменьшился с 17,4 до 12,3 % p увеличился с 0,834 до 0,934. Затем, чтобы продемонстрировать способность нашего метода противодействовать шуму, были протестированы данные о емкости с 10-процентным шумовым загрязнением, результаты по-прежнему демонстрируют хорошее качество после слияния изображений. В случае загрязнения шумом качество восстановленного изображения дефекта С улучшается более очевидно, E_r уменьшается с 18,8 до 12,6%, а p улучшается с 0,815 до 0,931.

Этот метод эффективно компенсирует некорректность визуализации системы ЭЕТ и повышает точность определения формы дефекта объекта. Он имеет большой потенциал для применения при контроле слоев седиментации, концентрации твердых частиц и дефектов внутри объектов.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (62104052), Фондом естественных наук провинции Гуанси (2021GXNSFBA196088), Фондом научных исследований Департамента образования Гуанси (2021KY0345), Стартовым фондом научных исследований Гуансийского научно-технического университета (21Z03), Ключевой лабораторией микроволновой связи и микро-нанофотоэлектрических технологий колледжей и университетов Гуанси.

Конфликт интересов при подаче данной рукописи отсутствует, рукопись одобрена всеми авторами для публикации. Ответственный автор хотел бы заявить от имени своих соавторов, что описанная работа является оригинальным исследованием, которое не было опубликовано ранее и не находится на рассмотрении для публикации в другом месте полностью или частично. Все перечисленные авторы одобрили прилагаемую работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ismail I., Gamio J., Bukhari S.A., Yang W. Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry // Flow measurement and instrumentation. 2005. V. 16. P. 145—155.
2. Hosseini M., Kaasinen A., Aliyari Shoorehdeli M., Link G., Lähivaara T., Vauhkonen M. System identification of conveyor belt microwave drying process of polymer foams using electrical capacitance tomography // Sensors. 2021. V. 21. P. 7170.
3. Gunes C., Chowdhury S., Marashdeh Q.M., Teixeira F.L. Displacement-current phase tomography and electrical capacitance tomography for air-water flow systems / In Proceedings of the 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). IEEE. 2017. P. 1—3.
4. Rimpiläinen V., Poutiainen S., Heikkinen L.M., Savolainen T., Vauhkonen M., Ketolainen J. Electrical capacitance tomography as a monitoring tool for high-shear mixing and granulation // Chemical Engineering Science. 2011. V. 66. P. 4090—4100.
5. Wang A., Marashdeh Q., Motil B.J., Fan L.S. Electrical capacitance volume tomography for imaging of pulsating flows in a trickle bed // Chemical Engineering Science. 2014. V. 119. P. 77—87.

6. *Rasel R.K., Zuccarelli C.E., Marashdeh Q.M., Fan L.S., Teixeira F.L.* Toward multiphase flow decomposition based on electrical capacitance tomography sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2017. V. 17. P. 8027—8036.
7. *Rymarczyk T., Kłosowski G., Kozłowski E.* A non-destructive system based on electrical tomography and machine learning to analyze the moisture of buildings // *Sensors*. 2018. V. 18. P. 2285.
8. *Zhang L., Dai L.* Image reconstruction of electrical capacitance tomography based on an efficient sparse Bayesian learning algorithm // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. V. 71. P. 1—14.
9. *Lei J., Liu S., Wang X., Liu Q.* An image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography based on robust principle component analysis // *Sensors*. 2013. V. 13. P. 2076—2092.
10. *Deabes W., Abdel-Hakim A.E., Bouazza K.E., Althobaiti H.* Adversarial resolution enhancement for electrical capacitance tomography image reconstruction // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 3142.
11. *Niderla K., Rymarczyk T., Sikora J.* Manufacturing planning and control system using tomographic sensors // *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2018. V. 8. P. 29—34.
12. *Peng L., Ye J., Lu G., Yang W.* Evaluation of effect of number of electrodes in ECT sensors on image quality // *IEEE Sensors Journal*. 2011. V. 12. P. 1554—1565.
13. *Huang C.N., Yu F.M., Chung H.Y.* Rotational electrical impedance tomography // *Measurement Science and Technology*. 2007. V. 18. P. 2958.
14. *Frounchi J., Bazzazi A.* High resolution rotary capacitance tomography system / In *Proceedings of the Proc. 3rd World Congress on IPT (Banff, Canada)*. 2003. P. 858—63.
15. *Murphy S.C., York T.A.* Electrical impedance tomography with non-stationary electrodes // *Measurement Science and Technology*. 2006. V. 17. P. 3042.
16. *Liu Z., Babout L., Banasiak R., Sankowski D.* Effectiveness of rotatable sensor to improve image accuracy of ECT system // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2010. V. 21. P. 219—227.
17. *Wajman R., Banasiak R., Babout L.* On the use of a rotatable ect sensor to investigate dense phase flow: A feasibility study // *Sensors*. 2020. V. 20. P. 4854.
18. *Guo Z.* New normalization method of imaging data for electrical capacitance tomography / In *Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*. IEEE. 2011. P. 1126—1130.
19. *Mou C.H., Peng L.H., Yao D.Y., Zhang B.F., Xiao D.Y.* A calculation method of sensitivity distribution with electrical capacitance tomography // *Chinese Journal of Computational Physics*. 2006. V. 23. P. 87.
20. *Jing L., Liu S., Zhihong L. et al.* An image reconstruction algorithm based on the extended Tikhonov regularization method for electrical capacitance tomography // *Measurement*. 2009. V. 42. P. 368—376.
21. *Qi-Nian J., Zong-Yi H.* On an a posteriori parameter choice strategy for Tikhonov regularization of nonlinear ill-posed problems // *Numerische Mathematik*. 1999. V. 83. P. 139—159.
22. *Yang W., Spink D., York T., McCann H.* An image-reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical-capacitance tomography // *Measurement Science and Technology*. 1999. V. 10. P. 1065.
23. *Yang W., Peng L.* Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography // *Measurement Science and Technology*. 2002. V. 14. P. R1.
24. *Xie M., Yang H., Zhao K., Yuan B., Li J., Liu J., Ying J., Huang Y., Ou J.* Regularization parameter optimization based on the constraint of Landweber algorithm for electrical capacitance tomography // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019. V. 69. P. 101620.