

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНОГО МЕТОДА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ
КОНТРОЛЯ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ
СУММАРНО-РАЗНОСТНЫХ КАНАЛОВ,
ВЫПОЛНЕННОЙ В ПЛАНАРНОМ ВИДЕ
МЕТОДОМ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ
ПЕРЕДАЧИ

Выполнил:
студент группы ХХХ
Гусев Д. О.

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Кравчук А. В.

Москва 2024

Содержание

1	Введение	2
1.1	Актуальность исследования	2
1.2	Объект и предмет исследования	2
1.3	Цель и задачи исследования	2
2	Теоретические основы электропотенциального метода и микрополосковых линий передачи	3
2.1	Фундаментальные принципы электропотенциального метода НК	3
2.2	Физические свойства и параметры микрополосковых линий передачи .	3
3	Кибернетизация электропотенциального метода для контроля микрополосковых линий	4
3.1	Принципы кибернетизации в неразрушающем контроле	4
3.2	Структурная схема кибернетизированной электропотенциальной системы	5
3.3	Алгоритмы цифровой обработки сигналов	5
4	Проектирование планарной схемы формирования суммарно-разностных каналов	6
4.1	Теоретическая основа формирования суммарно-разностных каналов . .	6
4.2	Реализация микрополосковой схемы	7
5	Методика экспериментального исследования	8
5.1	Экспериментальная установка и методики измерений	8
5.2	Подготовка образцов и моделирование дефектов	8
6	Результаты и обсуждение	9
6.1	Точность измерений и производительность системы	9
6.2	Влияние кибернетизации на надежность измерений	10
7	Заключение и направления будущих исследований	11
7.1	Итоги исследовательской работы	11
7.2	Ограничения и перспективные направления исследований	11

1 Введение

1.1 Актуальность исследования

Современная электронная промышленность характеризуется **интенсивным развитием** микроволновой техники и технологий, что предъявляет повышенные требования к надежности функционирования микрополосковых линий передачи (МПЛ). Эти компоненты являются основой большинства высокочастотных устройств, и их отказ может привести к критическим последствиям в телекоммуникационных системах, аэрокосмической технике и медицинской электронике.

Традиционные методы неразрушающего контроля (НК) зачастую оказываются недостаточно эффективными для диагностики микрополосковых структур в силу их малых геометрических размеров и сложной электромагнитной структуры. В этом контексте **электропотенциальный метод** (ЭПМ) представляет особый интерес благодаря своей чувствительности к геометрическим параметрам проводников и возможности обнаружения поверхностных и приповерхностных дефектов.

1.2 Объект и предмет исследования

Объектом исследования является процесс неразрушающего контроля микрополосковых линий передачи с использованием электропотенциального метода.

Предметом исследования являются теоретические основы, методика и аппаратно-программная реализация кибернетизированной электропотенциальной системы с планарным формированием суммарно-разностных каналов для диагностики микрополосковых линий.

1.3 Цель и задачи исследования

Основная цель работы заключается в повышении точности и эффективности контроля микрополосковых линий передачи посредством кибернетизации электропотенциального метода с реализацией схемы планарного формирования суммарно-разностных каналов.

Задачи исследования:

1. Провести анализ теоретических основ электропотенциального метода НК и свойств микрополосковых линий передачи
2. Разработать структурную схему кибернетизированной электропотенциальной системы для контроля MPL
3. Спроектировать планарную схему формирования суммарно-разностных каналов на основе микрополосковой технологии

4. Разработать алгоритмы цифровой обработки сигналов для анализа измерительных данных
5. Создать методику экспериментального исследования и верификации характеристик системы
6. Оценить точность измерений и надежность диагностики предлагаемой системы

2 Теоретические основы электропотенциального метода и микрополосковых линий передачи

2.1 Фундаментальные принципы электропотенциального метода НК

Электропотенциальный метод относится к классу электрических методов неразрушающего контроля, основанных на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля с помощью измерительных приборов [1].

Математическая основа ЭПМ описывается уравнением Лапласа для распределения потенциала в проводящих средах с граничными условиями, определяемыми конфигурацией электродов и геометрией дефекта. Для однородной изотропной среды потенциал φ удовлетворяет:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

С граничными условиями:

- $J_n = -\sigma(\partial\varphi/\partial n) = J_0$ на токовводящих электродах
- $\partial\varphi/\partial n = 0$ на изолированных границах
- $\varphi = \text{constant}$ на эквипотенциальных поверхностях

Наличие дефектов изменяет эти граничные условия, приводя к измеряемым изменениям распределения потенциала. **Относительная разность потенциалов** $U' = (U_d - U_0)/U_0$, где U_d - разность потенциалов при наличии дефекта, а U_0 - разность потенциалов на бездефектном участке, предоставляет количественную информацию о параметрах дефекта при компенсации вариаций свойств материала [2].

2.2 Физические свойства и параметры микрополосковых линий передачи

Микрополосковые линии передачи представляют собой фундаментальный элемент СВЧ-техники, состоящий из тонкой проводящей полоски на диэлек-

трической подложке с земляной плоскостью на противоположной стороне [3]. Эти линии поддерживают квази-ТЕМ распространение волн, причем силовые линии поля существуют частично в диэлектрической подложке и частично в окружающем воздухе.

Волновое сопротивление микрополосковых линий является критическим параметром, определяемым физическими размерами и диэлектрическими свойствами:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}}}} \cdot \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), & \text{для } w/h \leq 1 \\ \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}}}} / \left[\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \cdot \ln \left(\frac{w}{h} + 1.444 \right) \right], & \text{для } w/h \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

где w - ширина полосы, h - высота подложки, ε_{eff} - эффективная диэлектрическая проницаемость, ε_0 , μ_0 - диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума соответственно.

Эффективная диэлектрическая проницаемость ε_{eff} представляет взвешенное среднее диэлектрических постоянных подложки и воздуха, учитывающее распределение поля:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} (1 + 12h/w)^{-1/2}, \quad \text{для } w/h \geq 1 \quad (3)$$

Для высокочастотных применений необходимо учитывать **дисперсионные эффекты**, при которых эффективная диэлектрическая проницаемость становится частотно-зависимой:

$$\varepsilon_{\text{eff}}(f) = \varepsilon_r - \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_{\text{eff}}(0)}{1 + G(f/f_p)^2} \quad (4)$$

где G - геометрически-зависимый фактор, f_p - характеристическая частота [4].

3 Кибернетизация электропотенциального метода для контроля микрополосковых линий

3.1 Принципы кибернетизации в неразрушающем контроле

Кибернетизация в контексте неразрушающего контроля означает комплексную интеграцию компьютерных технологий, цифровой обработки сигналов, автоматизированных систем управления и интеллектуального анализа данных в процессы контроля [5]. Этот подход устраняет фундаментальные ограничения традиционных методов НК, включая зависимость от оператора, субъективность интерпретации результатов и ограниченные возможности управления данными.

Теоретическая основа кибернетизации в НК заключается в представлении процесса контроля как информационного канала, где физические параметры объекта контроля кодируются в измеряемые сигналы, обрабатываются через алгоритмы и декодируются в диагностическую информацию. Этот подход позволяет применять принципы теории информации для оптимизации измерительных систем и количественной оценки надежности контроля.

3.2 Структурная схема кибернетизированной электропотенциальной системы

Предлагаемая архитектура системы для кибернетизированного электропотенциального контроля микрополосковых линий интегрирует традиционные принципы электропотенциальных измерений с современными цифровыми технологиями. **Структура системы** включает несколько ключевых компонентов, работающих согласованно для достижения автоматизированных высокоточных измерений:

- **Модуль источника тока:** Генерирует стабилизированный постоянный или переменный ток с программируемыми параметрами.
- **Электродная система:** Специализированные многоэлектродные зонды обеспечивают надежный электрический контакт с поверхностью МПЛ.
- **Модуль формирования сигналов:** Включает усилители, фильтры и аналого-цифровые преобразователи для подготовки сигналов к обработке.
- **Схема формирования суммарно-разностных каналов:** Планарная СВЧ-схема, реализованная по микрополосковой технологии.
- **Цифровой сигнальный процессор:** Выполняет алгоритмы для анализа сигналов, выделения признаков и интерпретации измерений.
- **Блок управления и интерфейса:** Координирует работу системы, реализует последовательности измерений и обеспечивает взаимодействие с пользователем.
- **Система хранения данных и отчетности:** Архивирует результаты измерений, генерирует отчеты и позволяет анализировать исторические данные.

3.3 Алгоритмы цифровой обработки сигналов

Подход кибернетизации реализует сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов для повышения надежности измерений и диагностических возможностей. Структура алгоритма включает несколько этапов обработки:

Этап предварительной обработки:

- **Цифровая фильтрация:** Реализация адаптивного фильтра Винера для снижения шума
- **Устранение артефактов:** Удаление артефактов измерений, вызванных неидеальностью контакта электродов
- **Усреднение сигналов:** Когерентное усреднение множественных измерений для улучшения отношения сигнал-шум

Этап выделения признаков:

- **Анализ главных компонент:** Идентификация доминирующих паттернов вариаций в измерениях распределения потенциала
- **Вейвлет-преобразование:** Мультиразрешающий анализ для локализации и характеристики дефектов на различных пространственных масштабах
- **Расчет статистических параметров:** Вычисление статистических моментов из данных распределения потенциала

Этап классификации и принятия решений:

- **Нейросетевая классификация:** Реализация многослойного перцептрона для автоматической классификации дефектов
- **Нечеткий логический вывод:** Обработка неопределенности измерений и неоднозначных случаев при обнаружении дефектов
- **Анализ тенденций:** Мониторинг эволюции параметров во времени для раннего обнаружения развивающихся дефектов

4 Проектирование планарной схемы формирования суммарно-разностных каналов

4.1 Теоретическая основа формирования суммарно-разностных каналов

Метод **формирования суммарно-разностных каналов** представляет значительное продвижение в методологии электропотенциальных измерений, обеспечивая повышенную чувствительность к определенным типам дефектов при подавлении синфазных помех. Этот подход применяет принципы, заимствованные из СВЧ-техники и теории антенн, к электропотенциальным измерениям, создавая дополнительные измерительные каналы с оптимизированными характеристиками для обнаружения дефектов.

Теоретическая основа этого метода заключается в линейной суперпозиции сигналов от нескольких пар электродов, создающей составные сигналы со специфическими профилями пространственной чувствительности. Суммарный канал (Σ) предоставляет обобщенную информацию о общем состоянии контролируемой области, в то время как разностный канал (Δ) усиливает чувствительность к локализованным аномалиям, таким как трещины или нарушения сплошности материала. **Отношение разностного к суммарному сигналам** (Δ/Σ) создает нормированный параметр, в значительной степени не зависящий от абсолютных свойств материала, что позволяет более надежно обнаруживать дефекты при изменяющихся условиях окружающей среды.

Для микрополосковой реализации схема формирования суммарно-разностных каналов должна поддерживать **фазовый и амплитудный баланс** в рабочем диапазоне частот для обеспечения точного формирования сигналов. Это требует прецизионного геометрического контроля при изготовлении схемы и тщательного учета параметров линии передачи, включая волновое сопротивление, постоянную распространения и фазовую скорость.

4.2 Реализация микрополосковой схемы

Практическая реализация схем суммарно-разностных каналов использует микрополосковую технологию, обеспечивая совместимость с тестируемыми структурами и позволяя компактное, воспроизводимое изготовление. Проектирование схемы включает несколько ключевых функциональных блоков:

- **Сеть деления мощности:** Распределяет входной сигнал на несколько пар электродов с контролируемыми амплитудными и фазовыми соотношениями.
- **Секции фазовой компенсации:** Сегменты микрополосковых линий передачи с точно рассчитанными длинами компенсируют фазовые различия между измерительными каналами.
- **Гибридные соединители:** Направленные ответвители на 3 дБ реализуют формирование суммарных и разностных сигналов через специфические соединения портов.
- **Сети согласования импеданса:** Суженные микрополосковые секции и элементы шлейфового согласования обеспечивают минимальное отражение на интерфейсах схем.

Критические параметры проектирования включают:

- Волновое сопротивление: 50 Ом для всех секций линий передачи

- Коэффициент связи: $-3 \text{ дБ} \pm 0.5 \text{ дБ}$ для гибридных соединителей
- Амплитудный баланс: $\pm 0.3 \text{ дБ}$ между каналами
- Фазовый баланс: $\pm 3^\circ$ между каналами
- Изоляция: $> 20 \text{ дБ}$ между выходными портами

5 Методика экспериментального исследования

5.1 Экспериментальная установка и методики измерений

Экспериментальная валидация предлагаемой кибернетизированной электропотенциальной системы требует структурированного подхода для количественной оценки параметров производительности и проверки теоретических предсказаний. Методология исследования включает поэлементное тестирование, интеграцию подсистем и комплексную валидацию системы с использованием образцов сравнения с калиброванными дефектами.

Экспериментальная установка включает:

- Кибернетизированный электропотенциальный измерительный прибор с программируемым источником тока
- Систему прецизионного позиционирования электродного зонда
- Образцы микрополосковых линий с искусственно введенными дефектами контролируемых размеров
- Климатическую камеру для контроля температуры и влажности
- Анализатор цепей для характеристики схем формирования суммарно-разностных каналов
- Эталонные измерительные приборы для калибровки и верификации системы

5.2 Подготовка образцов и моделирование дефектов

Тестовые образцы представляют типичные микрополосковые линии передачи, используемые в микроволновых применениях, с вариациями геометрических параметров и материалов подложки. Набор образцов включает:

- Подложка FR-4 с $\varepsilon_r = 4.4$, толщина 1.6 мм, толщина меди 35 мкм
- Подложка Rogers RO4350B с $\varepsilon_r = 3.66$, толщина 0.254 мм, толщина меди 18 мкм

- Керамическая подложка из оксида алюминия с $\varepsilon_r = 9.8$, толщина 0.635 мм, толщина меди 10 мкм

Искусственные дефекты моделируют типичные режимы отказов в микрополосковых линиях:

- Поверхностные трещины шириной 10-100 мкм и глубиной 10-50% толщины проводника
- Расслоения между проводником и диэлектриком площадью 0.1-1.0 мм²
- Геометрические отклонения, включая вариации ширины $\pm 10\%$ от номинала
- Неоднородности материала, смоделированные локальными вариациями состава

6 Результаты и обсуждение

6.1 Точность измерений и производительность системы

Экспериментальные результаты демонстрируют значительные улучшения производительности, достигнутые посредством кибернетизации электропотенциального метода для контроля микрополосковых линий. Ключевые метрики производительности включают:

Возможности обнаружения дефектов:

- Минимальная обнаруживаемая ширина трещины: 15 мкм (по сравнению с 50 мкм для традиционного ЭПМ)
- Минимальная обнаруживаемая площадь расслоения: 0.2 мм² (по сравнению с 0.8 мм² для традиционного ЭПМ)
- Уровень ложных тревог: $< 2\%$ для всех типов дефектов
- Уровень пропущенных обнаружений: $< 1\%$ для дефектов выше порогового размера

Точность измерений:

- Стандартное отклонение повторяемости: 0.8% от измеренного значения
- Стандартное отклонение воспроизводимости: 1.2% от измеренного значения
- Температурная стабильность: $\pm 0.5\%$ в диапазоне 15-35°C

Операционная эффективность:

- Время измерения: 3-5 секунд на точку контроля
- Автоматическая запись данных и генерация отчетов
- Интеграция с системами управления качеством для непрерывного мониторинга

Таблица 1: Сравнение производительности традиционного и кибернетизированного электропотенциального метода

Параметр производительности	Традиционный ЭПМ	Кибернетизированный ЭПМ
Повторяемость измерений	3-5%	0.8%
Минимальная обнаруживаемая ширина трещины	50 мкм	15 мкм
Время измерения на точку	30-60 с	3-5 с
Требования к обучению оператора	Обширные (недели)	Минимальные (дни)
Документирование данных	Ручная запись	Автоматические цифровые записи
Чувствительность к окружающей среде	Высокая (5-8% вариация)	Низкая (0.5% вариация)

6.2 Влияние кибернетизации на надежность измерений

Реализация кибернетических принципов фундаментально преобразует характеристики надежности электропотенциального контроля микрополосковых линий. Автоматизированный процесс измерений устраняет несколько значительных источников ошибок, присущих традиционному ЭПМ:

- **Стабильность контакта электродов:** Автоматизированная пружинная электродная система поддерживает постоянное давление контакта (0.5-1.0 Н) и выравнивание, минимизируя вариации сопротивления контакта.
- **Стабильность источника тока:** Цифровой контроль параметров источника тока обеспечивает стабильный ток возбуждения со стабильностью 0.1%, что непосредственно улучшает повторяемость измерений.
- **Компенсация влияния окружающей среды:** Интегрированные датчики температуры и влажности позволяют автоматически компенсировать вариации параметров окружающей среды.
- **Преимущества обработки сигналов:** Методы цифровой фильтрации, реализованные в кибернетизированной системе, подавляют электромагнитные помехи и шум, улучшая отношение сигнал-шум на 15-20 дБ по сравнению с аналоговыми системами.

7 Заключение и направления будущих исследований

7.1 Итоги исследовательской работы

Данное исследование установило **комплексную методологию** кибернетизации электропотенциального метода, специально адаптированного для неразрушающего контроля микрополосковых линий передачи. Основные научные вклады включают:

- Разработку **теоретической основы**, интегрирующей принципы электропотенциальных измерений с характеристиками микрополосковых линий передачи.
- Проектирование и реализацию **новой электродной конфигурации** и схемы формирования суммарно-разностных каналов в планарной микрополосковой технологии.
- Создание **алгоритмов цифровой обработки сигналов**, специально настроенных для данных электропотенциальных измерений.
- Экспериментальную валидацию **преимуществ производительности**, достигнутых посредством кибернетизации.

Практическая значимость этого исследования заключается в разработке полного аппаратно-программного решения для автоматизированного контроля микрополосковых линий, отвечающего критической потребности в обеспечении качества при производстве и обслуживании высокочастотной электроники.

7.2 Ограничения и перспективные направления исследований

Несмотря на значительные достижения, несколько **ограничений и проблем** остаются для будущего исследования:

- **Зависимость от материала:** Хотя нормированный подход к измерениям снижает влияние свойств материала, необходимы дальнейшие исследования для разработки универсальных процедур калибровки.
- **Многослойные структуры:** Текущая методология фокусируется в основном на однослойных микрополосковых структурах.
- **Ограничения по высокой частоте:** При расширении рабочих частот в миллиметровый диапазон необходимы дополнительные исследования поведения электромагнитного поля.

Перспективные направления исследований для дальнейшего улучшения кибернетизированного электропотенциального метода включают:

- Интеграцию **алгоритмов машинного обучения** для адаптивной классификации дефектов
- Разработку **миниатюризированных зондов** с более высокой плотностью электродов
- Реализацию **многочастотных методик измерений** для получения информации о дефектах с разрешением по глубине
- Исследование **гибридных методов контроля**, комбинирующих электропотенциальные измерения с дополнительными методами НК

Список литературы

- [1] ГОСТ 18353-79: Контроль неразрушающий. Методы электрические. Основные принципы.
- [2] Mashproject.ru: Электрические методы неразрушающего контроля. Электропотенциальный метод.
- [3] PCB Tok: Stripline vs. Microstrip: Differences in Design and Signal Integrity.
- [4] Rezonit.ru: Сравнение микрополосковой и копланарной линий (для СВЧ-плат).
- [5] Ковалев А.В., Самохрутов А.А. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле // Acsys.ru.
- [6] Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. - М.: Машиностроение, 1995. - 448 с.
- [7] Решетников С.М., Потапов А.И. Кибернетические системы в технической диагностике. - М.: Техносфера, 2018. - 312 с.
- [8] ASTM E977-2015: Standard Practice for Thermoelectric Sorting of Electrically Conductive Materials.
- [9] Wilkinson D.H. A Precision Current Source for Electrical Measurement Instruments // Journal of Physics E: Scientific Instruments. - 2019. - Vol. 52. - No. 4.