

На правах рукописи



Тренкаль Евгений Игоревич

**СПОСОБ И УСТРОЙСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ И
ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ
МОДИФИЦИРОВАННОГО TDR-МЕТОДА**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства теле-
видения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)»

Научный руководитель:

Лоцилов Антон Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, зав. каф. Конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР), ТУСУР, г. Томск

Официальные оппоненты:

Суханов Дмитрий Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор каф. Радиофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

Ладур Александр Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «НПК ТАИР», г. Томск

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «24» декабря 2019 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/nrxmcajw>

Автореферат разослан «___» ноября 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физико-математических наук



А. Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Метод импульсной рефлектометрии, или TDR-метод, или рефлектометрия во временной области, широко применяется в различных областях науки и техники. Распространенность метода обусловлена его высокой универсальностью, точностью, наглядностью измеренных характеристик и низкой стоимостью внедрения.

В развитие метода рефлектометрии во временной области сделали вклад такие отечественные и зарубежные ученые, как Г. Глебович, А. Андриянов, В. Ильющенко, Б. Авдоченко, Т. Газизов, Н. Малютин, В. Кошелев, А. Заболоцкий, А. Лоцилов, Э. Семёнов, Н. Леонтьев, В. Тимошенков, А. Хлыбов, А. Понизовский, С. Чудинова, G. Ross, D. Robinson, C. Courtney, A. Cataldo, D. Benedetto, A. Nicolson, C. Nemarich, M. Gerding, S. Yahya и др.

Одним из первых применений метода импульсной рефлектометрии являлась локализация неисправностей в кабельных сетях в зданиях и транспортных средствах, в том числе для определения характера неисправностей. В дальнейшем метод импульсной рефлектометрии стал применяться для решения множества задач, таких, как: определение влажности строительных материалов с целью определения стойкости и износа строений (работы A. Cataldo, D. Benedetto и др.); определение параметров компонентов (Тимошенков, Хлыбов и др.); определение и локализация утечек жидкости из водопроводных труб (A. Cataldo, D. Benedetto и др.); определение комплексной диэлектрической проницаемости среды (A. Nicolson, G. Ross, C. Courtney, Kumbharkhane и др.); измерение уровней жидкостей в резервуарах (C. Nemarich, M. Gerding, A. Cataldo, S. Yahya и др.). Большое распространение в последнее двадцатилетие получило использование метода рефлектометрии для определения влажности почв (А. Понизовский, С. Чудинова, D. Robinson и др.).

Практическое использование метода рефлектометрии во временной области (TDR) сопряжено с решением двух типов задач:

- 1) определение расстояния до точек рассогласования волноведущей структуры по результатам анализа временных соотношений между составляющими рефлектометрического отклика;
- 2) определение параметров среды распространения сигнала по форме зарегистрированных откликов.

В первом случае для определения расстояния до точки локального рассогласования должны быть известны параметры среды распространения сигнала (диэлектрическая, магнитная проницаемость, скорость распространения сигнала), во втором – должны быть известны геометрические свойства объекта (длина линии передачи, функция поперечного сечения от координаты, положения точек рассогласования).

Необходимость в наличии априорной информации о параметрах среды распространения сигнала накладывает определенные ограничения на применение метода импульсной рефлектометрии для определения расстояний до точек рассогласования. Это выражается либо в необходимости предварительного измерения параметров материалов, либо в использовании справочных данных об измеряемых материалах. При этом отсутствует гарантия соответствия параметров измеряемых материалов и используемых справочных значений.

Данный недостаток можно продемонстрировать на примере практической задачи определения уровней границ раздела сред в нефтеперерабатывающей промышленности. В существующих технических решениях для рефлектометрического определения границы раздела между нефтью и подтоварной водой используется справочное значение диэлектрической проницаемости нефти, а диэлектрическая проницаемость воздуха считается равной единице. При этом допускается, что параметры слоёв неизменны во времени и не зависят от внешних условий, что зачастую не соответствует действительности. Кроме того, граница раздела сред между соседними слоями жидких сред зачастую представляет собой эмульсию, параметры которой достаточно сложно спрогнозировать. Повышение температуры жидких сред приводит к интенсивному испарению верхних слоев и изменению параметров воздушной среды над ними, что создает дополнительные сложности для корректного определения уровня.

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что в общем случае и ряде конкретных применений значения предварительно определенных параметров сред нельзя считать неизменными на протяжении всего интервала наблюдения.

В связи с этим, задача разработки научно обоснованных подходов к определению уровней границ раздела многослойных сред, позволяющих определять характеристики слоев исследуемых сред в процессе измерения уровня, является актуальной и востребованной.

Цель работы. Исследование и разработка способа рефлектометрического определения положения границ раздела и параметров многослойных сред, а также устройств для его осуществления.

Задачи исследования. Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

1. Аналитический обзор рефлектометрических методов и средств определения уровней многослойных сред.
2. Разработка модели зонда в виде ступенчато-нерегулярной линии передачи, содержащей сосредоточенные неоднородности, а также алгоритмов расчета частотных и импульсных характеристик зонда на основе разработанной модели.
3. Разработка алгоритмов обработки и интерпретации рефлектограмм, а также программного обеспечения, реализующего разработанные алгоритмы.

4. Разработка и изготовление устройств для реализации рефлектометрического определения уровней границы раздела и параметров слоев многослойных сред.

5. Экспериментальные исследования разработанных устройств.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы теории линейных электрических цепей, матричной алгебры, вычислительной математики. При создании комплекса программ использовались методы объектно-ориентированного и модульного программирования. Проверка основных теоретических положений осуществлялась на основе экспериментальных исследований изготовленных макетов.

Научная новизна работы. Предложен и программно реализован алгоритм предварительной обработки рефлектограмм многослойных структур, реализующий селекцию откликов, являющихся результатом многократных переотражений тестового сигнала в слоях исследуемой структуры с целью последующего их исключения из анализа.

Разработана модель измерительного зонда на основе ступенчато-нерегулярной линии передачи, содержащей сосредоточенные управляемые неоднородности, алгоритмы расчета частотных и временных характеристик зонда на основе разработанной модели.

Предложен и апробирован способ и устройства для анализа и экстракции параметров слоёв многослойных сред, основанные на использовании локальных неоднородностей в измерительном зонде с возможностью управления электрическими параметрами таких неоднородностей при проведении рефлектометрических измерений.

Предложены и экспериментально верифицированы варианты выполнения управляемых неоднородностей в конструкции зонда, а также конструкции измерительного зонда с управляемыми неоднородностями на основе двухпроводной и коаксиальной линий передачи.

Практическая ценность.

Разработанный способ предназначен для анализа и экстракции параметров многослойных сред в устройствах измерения уровней. Использование предложенного способа позволяет определить скорости распространения сигналов в слоях анализируемых многослойных сред при определении уровней, что позволяет минимизировать влияние изменения параметров сред на результаты измерений.

Реализация и внедрение результатов исследований.

Работа выполнена на кафедре Конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Результаты практического характера получены автором в рамках выполнения НИОКР “Микроволновый уровнемер”, договор № 7667ГУ/2015 от 08.10.2015 по

программе УМНИК Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 14.577.21.0279 от 26.09.2017г., идентификатор RFMEFI57717X0279.

Результаты работы внедрены в учебном процессе на кафедре Конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы представлялись на следующих конференциях и выставках:

- международная IEEE сибирская конференция по управления и связи SIBCON, г. Астана, 2017 г.;
- международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП, г. Новосибирск, 2016 г.;
- международная научно-техническая конференция «INTERMATIC», г. Москва, 2015, 2016 гг.;
- международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2015, 2019 гг.;
- международная научно-студенческая конференция МНСК: Радиотехника, электроника, связь, г. Новосибирск, 2016 г.;
- международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2016, 2017 гг.;
- всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, 2016 г.;
- международная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (РТ), г. Севастополь, 2016 г.;
- международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» ПРФН, г. Томск, 2016 г.;
- международная (всероссийская) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2015, 2017, 2018 гг.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. На основе анализа временных задержек отраженных импульсов от границ раздела многослойных сред установлена периодичность импульсных откликов, являющихся результатом многократных отражений между границами раздела сред, данный признак использован для исключения из анализа многократно-отраженных импульсов, что повышает достоверность определения структуры диэлектрического заполнения.

2. Предложенная модификация метода импульсной рефлектометрии, основанная на использовании в конструкции измерительного зонда управляемых неоднородностей, электрические параметры которых могут быть изменены

управляющим сигналом, обеспечивает возможность на основе анализа изменения рефлектограммы измерительного зонда определить скорости распространения сигнала в слоях многослойной среды и расстояния до границ раздела сред при отсутствии априорной информации о параметрах среды распространения сигнала.

3. Предложенные варианты исполнения измерительных зондов на основе коаксиальной и двухпроводной линий передачи, содержащих управляемые сосредоточенные неоднородности, позволяют обеспечить определение скоростей распространения электромагнитных сигналов в слоях исследуемых жидких многослойных сред, а также положений границ раздела слоев таких сред по результатам обработки рефлектограмм.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 20 работ, в том числе 4 в журналах из перечня ВАК, 3 публикации в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science. Подана 1 заявка на изобретение. Получено 3 свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 127 страниц, также 50 рисунков, 4 таблицы. Список использованных источников содержит 112 наименований. Общий объем приложений составляет 20 страниц.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, изложены научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен обзор работ, посвященных применению метода импульсной рефлектометрии (TDR-метода) для определения положений границ раздела и параметров многослойных структур. Обоснована необходимость разработки способов определения параметров слоёв многослойных структур в задаче определения положения границ раздела сред.

Материалы главы опубликованы в работе [4].

Во **второй главе** решены следующие задачи:

- 1) разработана обобщенная модель отрезка ступенчато-нерегулярной линии передачи, содержащей сосредоточенные неоднородности;
- 2) разработаны алгоритмы расчета частотных и импульсных характеристик ступенчато-нерегулярной линии передачи, описанной разработанной моделью;
- 3) Выполнена экспериментальная апробация разработанной модели;
- 4) Проведен анализ влияния параметров сосредоточенных неоднородностей на входные импульсные и частотные характеристики.

Материалы главы опубликованы в работах [2, 5, 10, 12].

Объектом моделирования является ступенчато-нерегулярная линия передачи, содержащая сосредоточенные неоднородности (комбинированная структура), обобщенная схема которой представлена на рис. 1.

Модель объекта представляет собой каскадное соединение регулярных отрезков линии передачи и двухполюсников, описывающих сосредоточенные неоднородности. В связи с этим целесообразно воспользоваться аппаратом классических матриц передачи.

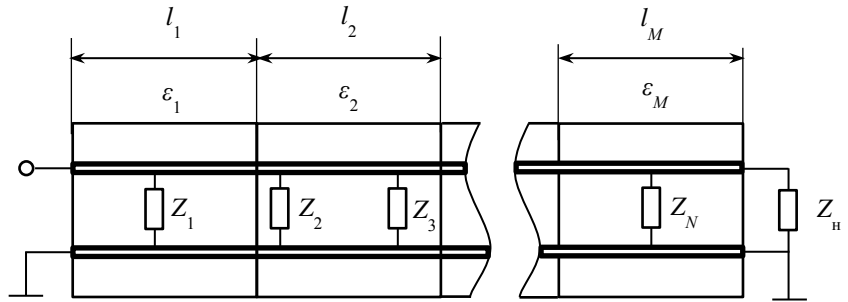


Рис. 1 – Обобщенная схема комбинированной структуры

Полная матрица передачи комбинированной структуры для заданной частоты будет равна произведению матриц передачи входящих в нее сегментов:

$$[a]_{\text{KC}} = \prod_{i=1}^M [a]_i, \quad (1)$$

где M – количество сегментов;

i – номер сегмента;

$[a]_i$ – матрица передачи i -го сегмента.

Эквивалентная матрица передачи $[a]$ сегмента, содержащая N сосредоточенных неоднородностей, может быть рассчитана по формуле:

$$[a] = \left(\prod_{j=1}^N [a]_{RL_j} \cdot [a_H]_j \right) \cdot [a]_{RL_{N+1}}, \quad (2)$$

где j – номер сосредоточенной неоднородности;

$[a]_{RL_j}$ – матрица передачи регулярного отрезка линии передачи;

$[a_H]_j$ – матрица передачи сосредоточенной неоднородности.

Алгоритм расчета входных импульсных и частотных характеристик комбинированной структуры включает следующие шаги:

1. Задание формы сигнала воздействия (тестового сигнала) $e(t)$;
2. Определение спектра тестового воздействия $E(f)$;
3. Расчёт матрицы передачи комбинированной структуры $[a]_{\text{KC}}$.
4. Определение входного сопротивления комбинированной структуры по выражению:

$$Z_{\text{ax}}(f) = \frac{[a]_{\text{KC}_{1,1}}(f) \cdot Z_H + [a]_{\text{KC}_{1,2}}(f)}{[a]_{\text{KC}_{2,1}}(f) \cdot Z_H + [a]_{\text{KC}_{2,2}}(f)}; \quad (3)$$

5. Определение временной зависимости напряжения на входе (рефлектограммы) комбинированной структуры:

$$U(t) = F^{-1} \left(E(f) \frac{Z_{\text{BX}}(f)}{Z_{\text{BX}}(f) + Z_{\Gamma}} \right), \quad (4)$$

где F^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье;

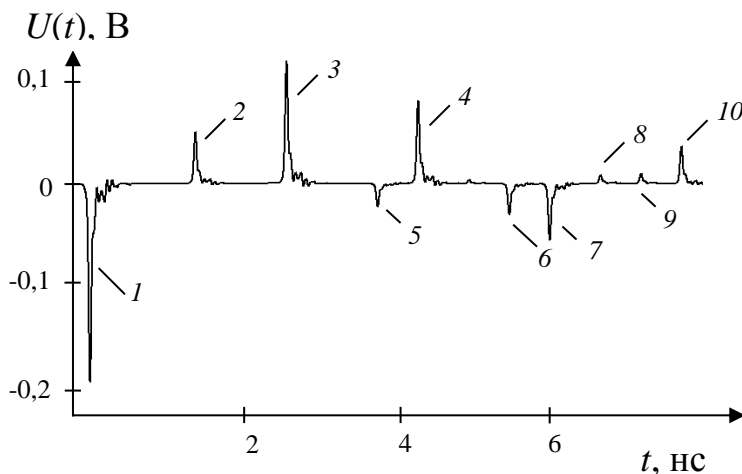
$E(f)$ – спектр тестового воздействия.

6. Расчёт входной частотной характеристики (матрицы рассеяния s_{11}).

Преимуществом анализа импульсных характеристик является наглядное представление пространственных характеристик измеряемой структуры, при этом форма и отраженных импульсов (откликов) позволяет определить характер рассогласования в волноведущей структуре.

Характерной особенностью рефлектограмм многослойных структур является наличие на них откликов, являющихся результатом как однократных отражений импульсного сигнала от границ раздела сред и конца линии передачи, так и многократных отражений сигнала между границами раздела слоёв (“паразитные” отклики).

На рис. 2 представлен пример расчётной рефлектограммы трёхслойной структуры с параметрами слоёв, представленными в таблице 1, содержащей как однократно отраженные отклики (см. рис. 2, поз. 2–4), так и “паразитные” отклики (см. рис. 2, поз. 5–10).



1 – тестовый импульс; 2, 3 – отклики от границы раздела сред; 4 – отклик от короткого замыкания на конце структуры; 5–10 – “паразитные” отклики

Рис. 2 – Рефлектограмма структуры

Таблица 1 – Параметры слоёв структуры

№	ϵ_r	α , дБ/м	Длина, м
1	1	0,5	0,2
2	3	1	0,1
3	80	2	0,025

В качестве базового критерия селекции “паразитных” откликов может быть использована общая задержка откликов в комбинированной структуре. В данном примере все отклики, поступившие на вход после отклика от конца комбинированной структуры (см. рис. 2 поз. 4), могут быть

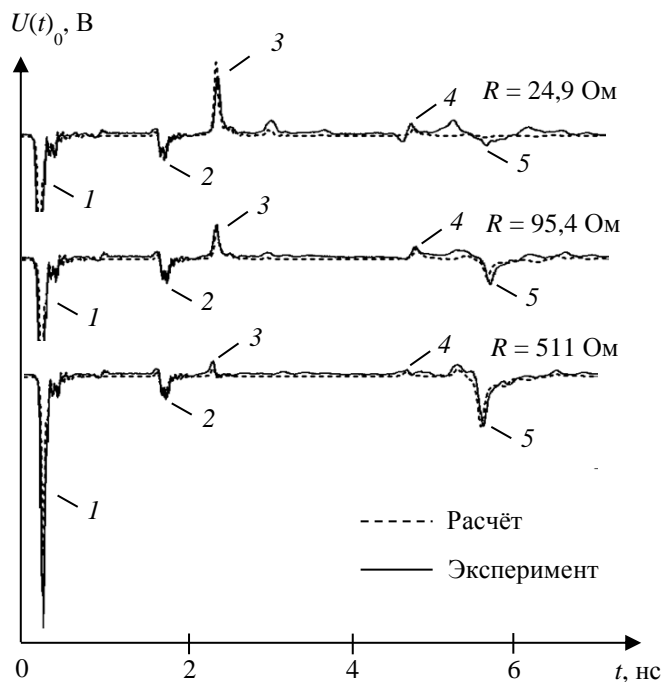
интерпретированы как “паразитные”. Однако, отклик на рефлектограмме (см. рис. 2., поз. 5) не удовлетворяет данному критерию, и может быть воспринят как отраженный от одной из границ раздела сред или конца измерительной линии. Кроме того, в практических задачах довольно часто отклик от конца измерительной линии не может быть однозначно определен.

Следовательно, задача определения “паразитных” откликов на рефлектограмме является актуальной. Анализ закономерностей возникновения “паразит-

ных” откликов и разработке алгоритмов их обнаружения с целью их селекции посвящена третья глава диссертации.

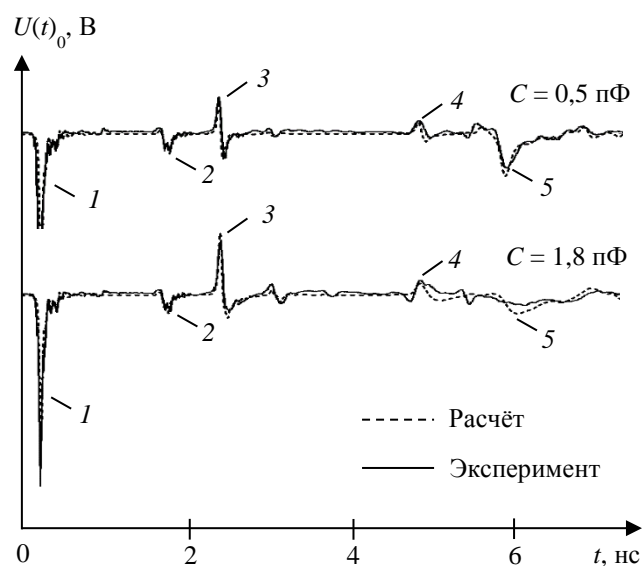
С целью анализа и верификации разработанной модели и алгоритмов были получены расчётные и экспериментальные характеристики (рис. 3, 4) копланарной линии передачи (КПЛ), содержащей две сосредоточенные неоднородности:

- резисторы с сопротивлениями 24,9 Ом; 95,3 Ом; 511 Ом (см. рис. 3);
- конденсаторы с электрической ёмкостью 0,5 пФ; 1,8 пФ (см. рис. 4).



1 – тестовый сигнал; 2 – отклик от входа КПЛ; 3 – отклики от резисторов; 4 – отклик от конца КПЛ.

Рис. 3 – Расчетные и экспериментальные рефлектограммы КПЛ с сосредоточенными резисторами 24,9 Ом; 95,4 Ом; 511 Ом.



1 – тестовый сигнал; 2 – отклик от входа КПЛ; 3 – отклики от конденсаторов; 4 – отклик от конца КПЛ.

Рис. 4 – Расчетные и экспериментальные рефлектограммы КПЛ с сосредоточенными конденсаторами 0,5 пФ; 1,8 пФ.

Изменение параметров сосредоточенных неоднородностей приводит к изменению амплитуд откликов от точек их локализации (см. рис. 3, 4, поз. 3, 4). Данное свойство может быть использовано для обеспечения опорных точек на рефлектограмме структуры, и положено в основу предлагаемого в третьей главе способа измерения, позволяющего при известных координатах установки сосредоточенных неоднородностей в структуре обеспечить измерение скорости распространения электромагнитных сигналов в каждом из слоёв многослойной структуры.

Представленные экспериментальные и расчётные характеристики показывают высокую степень совпадения, что говорит о корректности разработанной математической модели.

В **третьей главе** решены следующие задачи исследования:

- 1) выполнен анализ закономерностей распространения импульсных сигналов в ступенчато-нерегулярных средах;
- 2) разработан алгоритм селекции сигналов;
- 3) разработан алгоритм определения структуры слоёв и их параметров; ступенчато-нерегулярных сред на основе модифицированного TDR-метода.

Материалы главы опубликованы в работах [1, 2, 5, 11–13].

Как было показано ранее (см. рис. 2), рефлектограмма объекта представляет собой сложную совокупность откликов. Часть из таких откликов является результатом однократного отражения от границ раздела сред или неоднородностей – назовем их откликами нулевого порядка. Остальные являются результатом многократных переотражений сигнала между границами раздела в многослойной среде – будем называть их откликами высших порядков.

Порядок отклика определяется суммой количества повторных проходов сигнала в каждом из слоёв:

$$k = \sum_{i=1}^M k'_i, \quad (5)$$

где i – номер среды;

k'_i – количество повторных проходов сигнала через слой с номером i в прямом и обратном направлении.

Временные координаты откликов нулевого порядка (рис. 5) на рефлектограмме (при условии, что временная координата тестового сигнала равна нулю), отраженного от границы раздела, расположенной между сегментами с индексами i и $i+1$, определяются выражением:

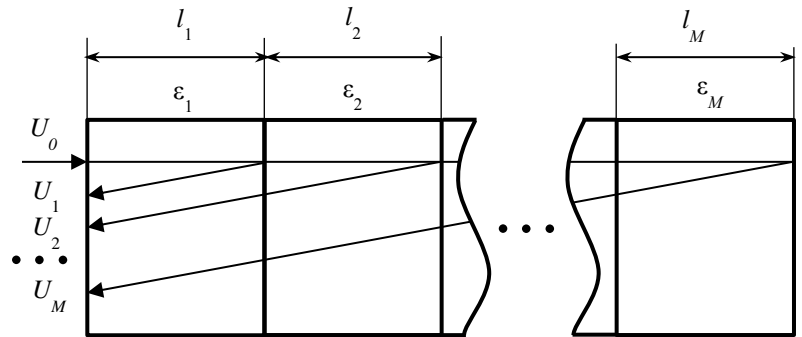


Рис. 5 – Распространение сигналов нулевого порядка в структуре из M сегментов

$$t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n = \sum_{i=1}^n \tau_i = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot \sqrt{\epsilon_{ri}}}{c} \quad (6)$$

где τ_i – время распространения сигнала в прямом и обратном направлении через слой с индексом i ;

n – номер границы раздела сред.

Для рассмотрения откликов высших порядков обозначим амплитуды и задержки откликов следующим образом: верхний индекс будет обозначать порядок отклика, в нижнем индексе через запятую будут перечислены количества проходов сигнала в прямом и обратном направлении в слое. Количество перепис-

ляемых через запятую индексов равно количеству слоев в рассматриваемой структуре.

Полученные выражения для временных координат для откликов k -го порядка для трехслойной среды имеют вид:

$$1: \quad t_{1,k+1,0}^k = \tau_1 + (k+1) \cdot \tau_2 \quad (7)$$

$$2: \quad t_{1,k+1,1}^k = \tau_1 + (k+1) \cdot \tau_2 + \tau_3 \quad (8)$$

$$3: \quad t_{1,k,2}^k = \tau_1 + k \cdot \tau_2 + 2 \cdot \tau_3 \quad (9)$$

$$4: \quad t_{1,k-1,3}^k = \tau_1 + (k-1) \cdot \tau_2 + 3 \cdot \tau_3 \quad (10)$$

...

$$N_o(k)-1: \quad t_{1,2,k}^k = \tau_1 + 2 \cdot \tau_2 + k \cdot \tau_3 \quad (11)$$

$$N_o(k): \quad t_{1,1,k+1}^k = \tau_1 + \tau_2 + (k+1) \cdot \tau_3 \quad (12)$$

где $N_o(k)$ – количество откликов k -го порядка, возникающих в многослойной среде.

На основании анализа выражений (7–12), можно сделать вывод о том, что временные координаты откликов высших порядков имеют признак периодичности относительно откликов нулевого порядка (6), а временные координаты откликов высших порядков являются суммой временной координаты отклика нулевого порядка и кратного числа одной или нескольких временных задержек τ_i .

На рис. 6 приведена рефлектограмма, иллюстрирующая описанные закономерности. Указанный признак положен в основу разработанного алгоритма селекции сигналов, позволяющего определить и исключить из дальнейшего анализа отклики высших порядков.

Разработанный алгоритм селекции сигналов включает следующие шаги:

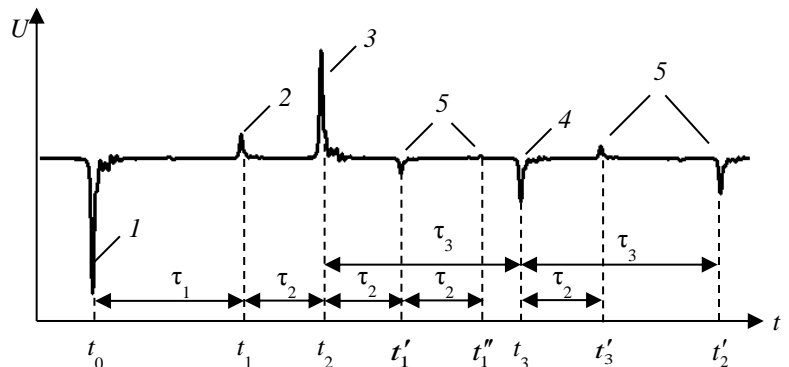
1) Формирование вектора T временных координат отраженных импульсов. Определяются положения на оси времени всех отраженных импульсов, амплитуда которых превышает некоторую пороговую величину δ (чувствительность). Результаты заносятся в матрицу T .

2) Формирование вектора уникальных задержек BD .

Выполняется расчет взаимных задержек между откликами:

$$\Delta = T_i - T_j$$

где N – количество элементов матрицы T .



1 – тестовый импульс; 2 – отклик от первой границы раздела; 3 – отклик от второй границы раздела; 4 – отклик от конца линии; 5 – отклики высших порядков.

Рис. 6 – Рефлектограмма структуры при $M = 3$

$$i = 2 \dots N - 1;$$

$$j = 1 \dots i - 1$$

В матрицу BD добавляются только те значения Δ , которые являются уникальными.

3) Селекция откликов нулевого порядка, формирование матрицы TP .

К откликам нулевого порядка относятся те элементы матрицы T , значение которых не может быть получено в виде суммы значения одного из элементов матрицы TP и значения какого-либо элемента матрицы уникальных задержек BD .

В результате работы алгоритма в вектор TP будут записаны амплитуды и временные задержки откликов нулевого порядка. Таким образом, отклики высших порядков будут исключены из дальнейшего анализа.

В тексте диссертации также приведен анализ закономерностей изменения амплитуд откликов и оценка возможности использования этих закономерностей в качестве дополнительного признака для селекции откликов.

Способ определения структуры и параметров ступенчато-нерегулярных сред на основе модифицированного TDR-метода. Для определения расстояния до точки локального рассогласования в многослойной среде при использовании рефлектометрического метода должны быть известны скорости распространения сигнала во всех слоях, предшествующих искомой точке рассогласования:

$$l_n = v_1 \cdot \frac{t_1}{2} + v_2 \cdot \frac{t_2}{2} + \dots + v_n \cdot \frac{t_n}{2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_i \cdot t_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ri}}} \cdot t_i \quad (13)$$

Для устранения данного недостатка, предлагается использовать модификацию известного подхода к TDR-измерениям, в рамках которой, в заданные координаты анализируемой волноведущей структуры вносятся неоднородности с управляемыми электрическими параметрами – управляемые неоднородности. С точки зрения практического использования предложенная модификация может быть реализована путем применения измерительного зонда с периодическими управляемыми элементами в его конструкции.

Управление электрическими параметрами неоднородностей позволяет изменять коэффициенты отражения электромагнитного сигнала в определенных точках волноведущей структуры, что приводит к локальному изменению рефлектограммы объекта. Данное свойство было показано ранее на рис. 3, 4. Информация о задержках откликов, отраженных от неоднородностей с известной локализацией, позволяет определять скорости распространения электромагнитных волн в слоях комбинированной структуры, а также расстояния до интересующих точек локального рассогласования.

Преимуществом использования предлагаемого подхода является возможность определения структуры и параметров многослойных сред при отсутствии априорной информации о параметрах среды распространения сигнала. Управление электрическими параметрами сосредоточенных неоднородностей может вы-

полняться как путем задания специальной формы сигнала генератора, так и внешним управляющим сигналом.

Управление параметрами сосредоточенных неоднородностей необходимо для определения «источника» отклика на рефлектограмме объекта. Изменение параметров управляемых неоднородностей позволяет однозначно определить, какие из откликов являются результатом отражения от управляемых неоднородностей, а какие являются результатом отражения от границ раздела сред многослойной структуры.

Наиболее предпочтительным случаем в процессе управления параметрами неоднородностей является вариант, при котором в одном из состояний управляемых неоднородностей обеспечивается минимизация их влияния на распространяющийся сигнал, что приводит к отсутствию отклика от точки включения неоднородности (так называемое «отключенное» состояние).

Структурная схема установки, позволяющей реализовать предложенный алгоритм, представлена на рисунке 7. Установка содержит генератор тестового сигнала и приёмник, выходы

которых соединены с входом ступенчато-нерегулярной линии передачи, разделенной на отрезки длинами l_1, l_2, \dots, l_M , каждый из которых располагается в среде с диэлектрическим заполнением $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \dots, \epsilon_{rM}$, соответственно. Выход линии передачи подключен к сопротивлению нагрузки Z_H . Управляемые неоднородности $Z_1, Z_2 \dots Z_N$ расположены в каждом из регулярных отрезков линий передачи на расстояниях $x_1 \dots x_N$ от входа линии.

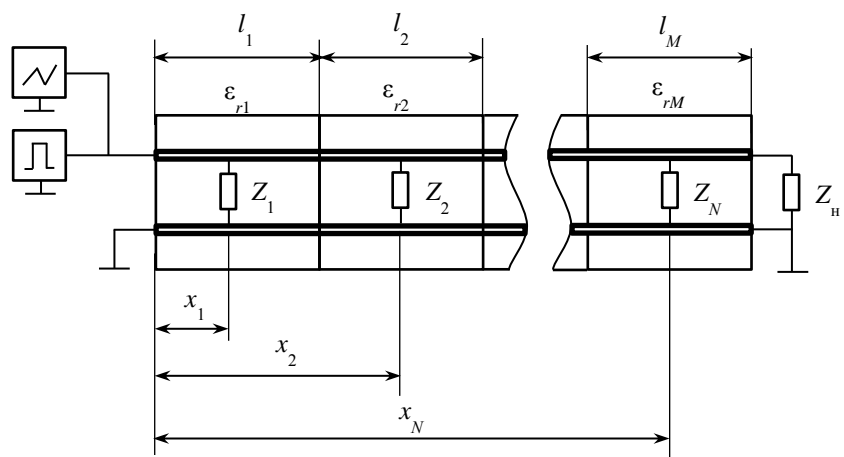


Рис. 7 – Структурная схема установки

Алгоритм работы устройства, реализующий предложенный подход, следующий:

Шаг 1. Измерение рефлектограммы $U(t)_0$, соответствующей состоянию линии передачи, при котором все входящие в ее состав управляющие неоднородности «отключены», либо их влияние сведено к минимуму, т.е. их сопротивление максимально.

Шаг 2. Последовательное изменение состояний неоднородностей и измерение рефлектограмм линии передачи $U(t)_1 - U(t)_K$, где K – количество возможных комбинаций состояний неоднородностей, достаточное для проведения измерения.

Шаг 3. Анализ измеренных рефлектограмм с целью формирования двух векторов временных координат:

T_B – вектор, содержащий временные координаты t_0, t_1, t_2 откликов, отраженных от границ раздела сред;

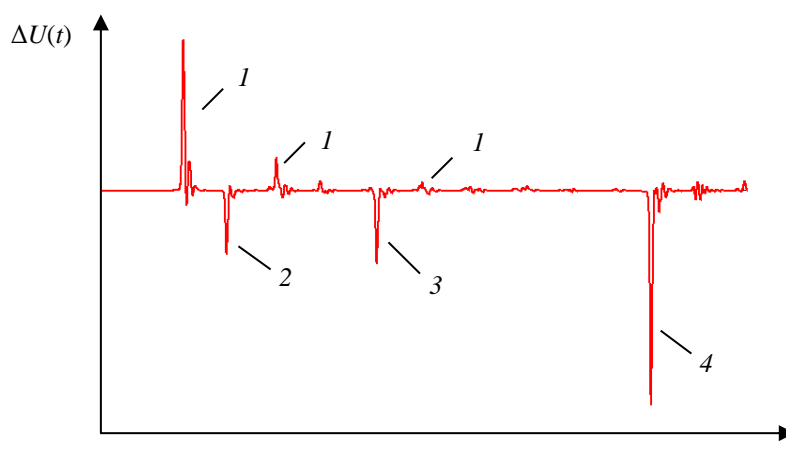
T_L – вектор, содержащий временные координаты t_1', t_2', t_3' откликов, отраженных от неоднородностей.

Для определения временных координат t_1', t_2', t_3' и формирования вектора T_L следует предварительно рассчитать функции разности рефлектограмм $\Delta U_k(t)$ по формуле:

$$\Delta U_k(t) = |U_k(t)| - |U_0(t)|. \quad (14)$$

Разностные рефлектограммы $\Delta U_k(t)$ позволяют отделить отклики от управляемых неоднородностей от откликов, отраженных от границ раздела сред с различным диэлектрическим заполнением по полярности импульса на разностной рефлектограмме. Импульсы положительной полярности соответствуют откликам от управляемых неоднородностей, импульсы отрицательной полярности – откликам от границ раздела многослойных сред.

Пример разностной рефлектограммы приведен на рис.8. Описанное свойство является критерием селекции откликов при использовании предложенной модификации TDR-метода.



1 – отклики от сосредоточенных неоднородностей;
2, 3 – отклики от границы раздела между сегментами;
4 – отклик от конца линии.

Рис. 8 – Разностная рефлектограмма структуры

Шаг 4. Нормирование векторов временных координат T_B и T_L путем вычитания временной координаты тестового сигнала t_0 . Нормированные вектора T_B^N и T_L^N имеют физический смысл задержек откликов относительно тестового сигнала.

Шаг 5. Формирование вектора задержек D , содержащего M элементов (по числу слоёв многослойной среды), каждый из которых представляет собой вектор $[d]_i$ из N_i элементов (по числу неоднородностей в слое с индексом i):

$$D = \begin{bmatrix} [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{N_i}]_1 \\ [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{N_i}]_2 \\ \dots \\ [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{N_i}]_M \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где i – номер слоя ($1 \dots M$);

M – количество слоев многослойной среды;

j – номер неоднородности в слое i ($1 \dots N_i$);

N_i – количество неоднородностей в слое i .

Элементы d_j векторов $[d]_1, [d]_2, \dots, [d]_M$, входящих в состав вектора D , содержат информацию о задержке отклика от неоднородности j , расположенной в слое i , относительно отклика от начала слоя i . При этом на каждый слой среды может приходиться одна или несколько неоднородностей.

Вектор расстояний S имеет структуру, аналогичную структуре вектора задержек D с тем лишь отличием, что элементы s_j транспонированных векторов $[s]_1, [s]_2, \dots, [s]_M$, входящих в состав вектора S , содержат информацию о расстоянии от неоднородности j , расположенной в слое i , до начала слоя i .

$$S = \begin{bmatrix} [s_1 & s_2 & \dots & s_{N_i}]_1 \\ [s_1 & s_2 & \dots & s_{N_i}]_2 \\ \dots \\ [s_1 & s_2 & \dots & s_{N_i}]_M \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Для определения параметров последующих слоев анализируемой среды должны быть известны параметры предыдущих слоев. Заполнение элементов вектора $[s]_i$, определение скоростей распространения v_i электромагнитных сигналов в слоях многослойной среды и длин каждого из таких слоев h_i выполняется последовательно от начала измерительного зонда к его концу по следующему алгоритму:

1) определение расстояний до неоднородностей s_j (вектора $[s]_i$), для слоя среды с номером i . Расстояние до неоднородностей определяется конструкцией измерительной линии и суммой длин предшествующих слоев измеряемой среды.

2) вычисление среднего значения скорости распространения сигнала v_i в среде с номером i выполняется по формуле:

$$v_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{2 \cdot (S_i)_j}{(D_i)_j}. \quad (17)$$

3) расчет длины слоя с номером i многослойной среды выполняется по формуле:

$$l_i = \frac{v_i \cdot (T_{B_{i+1}}^N - T_{B_i}^N)}{2} \quad (18)$$

Результатами расчета по приведенному алгоритму являются:

– вектор скоростей распространения сигнала в слоях исследуемой среды v , состоящий из элементов v_1, v_2, \dots, v_M ;

– вектор длин слоев исследуемой среды, состоящий из элементов l_1, l_2, \dots, l_M .

При этом каждый из элементов вектора скоростей распространения может быть пересчитан в относительную диэлектрическую проницаемость, соответствующую этому слою:

$$\varepsilon_{ri} = \left(\frac{c}{v_i} \right)^2 \quad (13)$$

На основании разработанного алгоритма выполнен расчётный эксперимент, демонстрирующий восстановление длин слоев исследуемой среды, а также определение скоростей распространения сигналов в слоях по результатам обработки рефлектограмм.

Четвёртая глава посвящена экспериментальным исследованиям и практической реализации модифицированного TDR-метода, предложенного в третьей главе, основанного на использовании в линии передачи управляемых сосредоточенных неоднородностей.

Материалы главы опубликованы в работах [6, 8, 14].

Предложено два варианта реализации измерительного зонда для модифицированного TDR-метода, отличающихся способом управления параметрами сосредоточенных неоднородностей:

- 1) способ, реализующий независимое управление параметрами каждой из сосредоточенных неоднородностей по отдельным линиям;
- 2) способ, реализующий одновременное управление параметрами сосредоточенных неоднородностей по измерительной линии передачи.

Преимуществом первого способа является отсутствие влияния управляемого компонента в линии на все предшествующие точки рассогласования. В результате изменения на рефлектограмме произойдут только начиная с точки включения неоднородности, управление которой выполняется в данный момент. Недостатком первого способа управления является необходимость использования дополнительных линий для управления неоднородностями, что во множестве случаев неприемлемо при практической реализации.

В результате анализа возможных вариантов исполнения управляемых неоднородностей, сделан вывод о возможности использования таких высокочастотных полупроводниковых компонентов, как СВЧ-диоды, СВЧ-транзисторы и варикапы. СВЧ-диоды, а также варикапы, могут быть использованы в качестве управляемых сосредоточенных неоднородностей в варианте исполнения, не предусматривающего использования дополнительных линий. В качестве управляющего сигнала для них может быть применено постоянное напряжение смещения, приложение которого не влияет на подаваемый в линию импульсный сигнал.

Для апробации модифицированного способа измерения и предложенных управляемых компонентов был изготовлен макет зонда, представляющий собой копланарную линию передачи, содержащую управляемые неоднородности. В качестве управляющего сигнала было использовано постоянное напряжение смещения, изменение которого приводит к изменению состояний СВЧ-диодов.

На рис. 9 представлена схема экспериментальной установки, которая включает в себя:

- генератор импульсов, состоящий из опорного генератора Geozondas GZ1105DLP2 и формирователя GZ1117DN-35;
- стробоскопический осциллограф DSA 8300;
- разветвитель Picosecond 5372;
- втулку питания Picosecond 5545;
- линию передачи с управляемыми неоднородностями.

Для анализа режимов управления импульсными характеристиками в отрезок компланарной линии передачи был включен СВЧ-диод HSMS-8202.

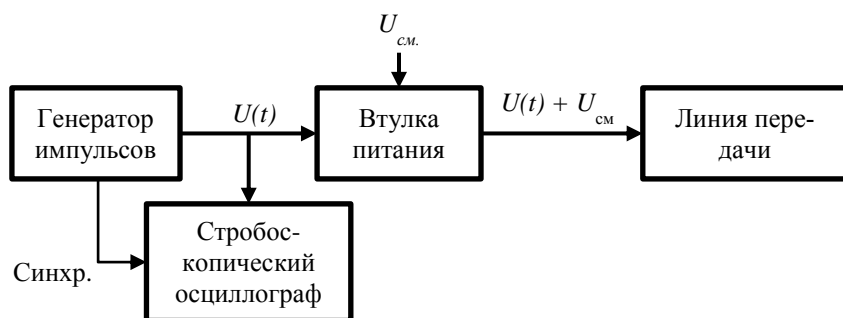


Рис. 9 – Структурная схема экспериментальной установки

различных напряжениях смещения.

В случае воздействия отрицательного импульса при $U_c = 0$ В диод переходит в открытое состояние, что приводит к формированию отклика амплитудой около 0,15 В. Увеличение напряжения ($U_c = 2$ В) сохраняется закрытое состояние диода при прохождении импульса через точку его включения. Отклик в закрытом состоянии обусловлен собственными паразитными параметрами СВЧ-диода. Таким образом, показана возможность применения диодов в качестве управляемых неоднородностей в конструкции измерительного зонда.

Для апробации предложенного модифицированного TDR-метода проведено экспериментальное исследование, целью которого являлось определение длин и эквивалентных диэлектрических проницаемостей двухсегментной КПЛ, содержащей две управляемые неоднородности.

Деление на сегменты выполнялось путем частичного погружения КПЛ в жидкость, что приводило к изменению эффективной диэлектрической проницаемости погруженной части линии.

Катод диода подключался к сигнальному проводнику, а анод – к проводнику земли. На вход линии подавался импульсный сигнал отрицательной полярности с различными напряжениями смещения, равными 0, 1 и 2 В. На рис. 10 представлены отклики диода при раз-

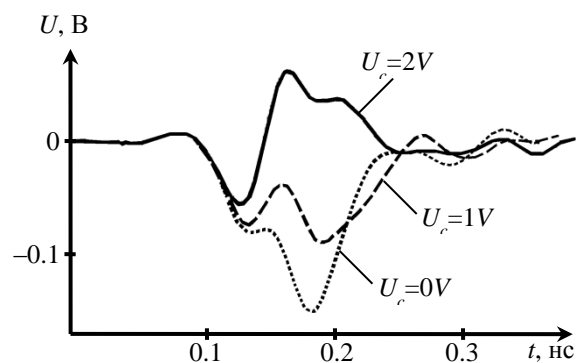


Рис. 10 – Отклик от СВЧ-диода при различных напряжениях смещения

Управляемые неоднородности были расположены на расстояниях 60 мм и 290 мм от входа КПЛ. Расстояние от входа линии до границы раздела составляло 225 мм.

На рисунке 11 представлен фрагмент рефлектограммы для двух состояний управляемых неоднородностей. Используя полученные экспериментальные характеристики, проведен расчет параметров по предложенному в третьей главе алгоритму.

Полученные результаты представлены в таблице 2.

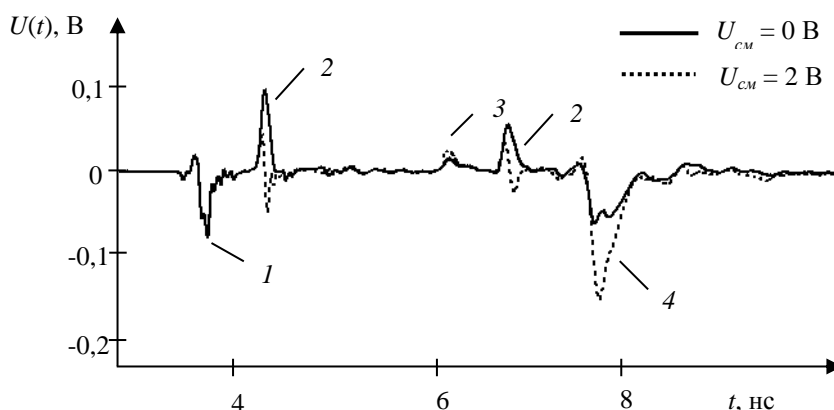
Таблица 2 – Результаты расчёта

Величина	Расчёт	Эксперимент	δ , %
v_1 , м/с	$1,914 \cdot 10^8$	$2,242 \cdot 10^8$	4,69
v_2 , м/с	$1,587 \cdot 10^8$	$1,529 \cdot 10^8$	3,63
ϵ_{r1} эфф	2,457	2,242	8,77
ϵ_{r2} эфф	3,574	3,849	7,68
l_1 , мм	225	244	8,42
l_2 , мм	125	115	8

- 1) введение более точных алгоритмов определения положения отклика;
- 2) увеличение количества управляемых неоднородностей в структуре.

Предложены варианты реализации линии передачи в коаксиальном и двухпроводном исполнении. По предложенному способу и устройствам подана заявка на изобретение [8]. Изготовлен зонд в коаксиальном исполнении для реализации способа. На рис. 12 представлена фотография экспериментальной установки с подключенным измерительным зондом, реализующий модифицированный TDR-метод.¹

Предложенная конструкция может быть использована для решения задачи измерения уровней и параметров жидких веществ, и может быть легко адаптирована для практического применения в резервуарах различной длины за счет возможности изменения длин сегментов.



1 – отклик от входа линии; 2 – отклики от первого и второго диода; 3 – отклик от границы раздела; 4 – отклик от конца измерительной линии.

Рис. 11 – Рефлектограмма линии передачи с двумя управляемыми неоднородностями

Погрешность расчета для длин сегментов не превышает 10 %, а для скоростей распространения – 5 %.

В качестве возможных способов повышения точности можно выделить следующие методы:

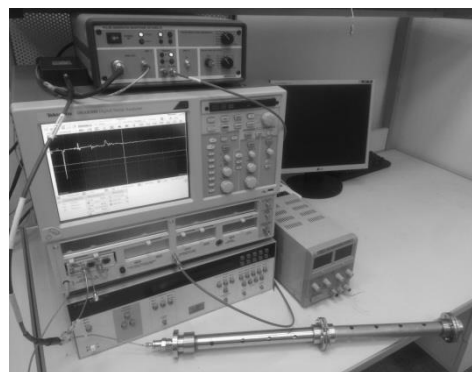


Рис. 12 – Фотография экспериментальной установки

¹ Экспериментальные измерения выполнены на оборудовании ЦКП «Импульс»

Заключение

В рамках выполнения диссертационной работы решены поставленные задачи исследований и получены следующие научные результаты:

- разработана модель измерительного зонда в виде ступенчато-нерегулярной линии передачи с сосредоточенными регулируемым неоднородностями, позволяющая проводить анализ частотных и импульсных характеристик, а также решать обратную задачу вычисления структуры многослойной среды и параметров входящих в неё слоёв;

- дана классификация откликов при рефлектометрическом анализе ступенчато-нерегулярных линий передачи, а также предложен и программно реализован алгоритм селекции сигналов, позволяющий определить названные откликами нулевого порядка однократного отражения от границ раздела и неоднородностей, на фоне откликов многократного отражения, названные откликами высшего порядка.

- разработан способ определения длин и параметров ступенчато-нерегулярных сред, основанный на использовании управляемых неоднородностей в линии передачи (зонде). Предложенный способ позволяет на основе обработки серии рефлектограмм, полученных при различных параметрах управляемых неоднородностей, определять скорости распространения сигнала в слоях ступенчато-нерегулярной среды, что позволяет без наличия априорной информации определять длины слоёв измеряемой структуры. Выполнена экспериментальная апробация разработанного способа.

- разработаны конструкции измерительного зонда в двухпроводном и коаксиальном исполнении.

Рекомендации при практическом внедрении полученных результатов:

- для обеспечения минимального затухания сигнала к концу измерительной линии ступенчато-нерегулярной структуры следует минимизировать влияние управляемых неоднородностей в “отключенном” состоянии;

- для обеспечения минимизации влияния управляемых включений следует использовать компоненты с малым значением паразитных параметров.

Дальнейшее развитие работы:

- совершенствование алгоритмов селекции сигналов, в том числе путем анализа соотношений между амплитудами откликов на рефлектограмме;

- определение частотных зависимостей диэлектрической проницаемости сред и учет их влияния при определении положений границ раздела многослойных сред;

- модификация предложенного способа, обеспечивающая учет влияния частотных зависимостей комплексных сопротивлений управляемых неоднородностей при определении положений откликов;

- практическая реализация и экспериментальная апробация устройств, реализующих предложенный способ, для различных прикладных областей применения;

- разработка и оптимизация управляемых неоднородностей, обеспечивающих минимальное паразитное влияние в “отключенном” состоянии и вариацию параметров в широких пределах;

- комплексирование разработанной модификации TDR-метода и фазовых методов определения диэлектрических параметров многослойных сред.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, индексируемых в Web of Science, Scopus

1. **Trenkal E.I.** The Algorithm of Primary Responses Selection for TDR Analysis of Multilayer Liquids / E.I. Trenkal, A.G. Loschilov // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2016 13th International Scientific-Technical Conference on. – 2016. – Vol. 1, Iss. 1 – PP. 473–475.

2. **Trenkal E.I.** Method for improving measurement accuracy of multilayer environment levels using time domain reflectometry / E.I. Trenkal, A.G. Loshchilov // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2017. – PP. 1–5.

3. **Trenkal E.I.** Impedance Transformers Simulation for Matching of Cascades of L-band SAR ERS Power Amplifiers / E.I. Trenkal, N.D. Malyutin // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – 2019, DOI: 10.1109/USBREIT.2019.8736584.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

4. **Тренкаль Е.И.** Измерение уровней жидкости методом импульсной рефлектометрии (обзор) / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лошилов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 67–73.

5. **Trenkal E.I.** New approach for increasing the precision of TDR analysis of multilayer environments / E.I. Trenkal, A.G. Loshchilov // Proceedings of TUSUR University. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 5–9.

6. **Trenkal E.I.** A breadboard model of the measuring probe of a new type for the measurement of multiphase environments levels / E.I. Trenkal, A.G. Loshchilov // Proceedings of TUSUR University. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 30–32.

7. **Тренкаль Е.И.** Расчетно-экспериментальный метод анализа волн в нерегулярных связанных полосковых линиях с сосредоточенными неоднородностями / Е.И. Тренкаль, Н.Д. Малютин, А.Г. Лошилов, В.Н. Федоров // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 17–25.

Защита интеллектуальной собственности

8. Заявка на изобретение. Российская Федерация, МПК G01F23/28. Способ измерения уровней многослойных сред и устройство для его осуществления / Лошилов А.Г., **Тренкаль Е.И.** / Заявитель ООО «Специальное конструкторское бюро «Смена» (RU). – №2019109440/28; заявл. 29.03.2019.

Статьи в других изданиях

9. **Тренкаль Е.И.** Экспериментальная установка для рефлектометрических исследований параметров многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лошилов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2015». – М.: МИРЭА, 2015, Ч. 1. – С. 59–62.

10. **Тренкаль Е.И.** Модель измерительной системы для рефлектометрического анализа параметров многофазной жидкости / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лошилов // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо–2015). Севастополь, 6–12 сентября 2015 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь, 2015. – Т. 2. – С. 888–889.

11. **Тренкаль Е.И.** Измерение уровней жидкости методом TDR / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2016»*. – 2016. – Ч. 3. – С. 210–215.

12. **Тренкаль Е.И.** Алгоритм селекции полезных сигналов в задаче TDR-измерения уровней многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // *Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Радиотехника, электроника, связь / Новосиб. гос. техн. ун-т.* – Новосибирск, 2016. – С. 58.

13. **Trenkal E.I.** Method for increasing the precision of TDR analysis of multiphase liquids / E.I. Trenkal, A.G. Loschilov // *Электронные средства и системы управления: материалы докладов XII Международной научно-практической конференции: в 2 ч.* – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2016. – С. 213–217.

14. **Тренкаль Е.И.** Алгоритм селекции полезных сигналов в задаче TDR-измерения уровней многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // *Электроника и микроэлектроника СВЧ: сборник трудов всероссийской научно-технической конференции.* – 2016. – Т. 1. – С. 222–226.

15. **Тренкаль Е.И.** Алгоритм селекции первичных сигналов в задаче TDR-анализа многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // *Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016: материалы XIII международной научно-технической конференции: в 12 томах.* – 2016. – Т. 6. – С. 113–116.

16. **Тренкаль Е.И.** Новый подход к рефлектометрическому анализу многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2016»: материалы 12-ой международной научно-технической конференции.* – 2016. – С. 146.

17. **Тренкаль Е.И.** Способ повышения точности измерения уровней многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // *Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.* – 2017. – Т. 7. – С. 114–116.

18. **Тренкаль Е.И.** Макет измерительного зонда нового типа для измерения уровней многослойных сред / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // *Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции.* – 2017 г. – Ч. 1. – С. 175–178.

19. **Тренкаль Е.И.** Способ измерения диэлектрической проницаемости жидких веществ / Е.И. Тренкаль, Е.А. Смолькова // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР: по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.* – 2018. – Ч. 2. – С. 62–65.

20. Смолькова Е.А. Способ измерения диэлектрической проницаемости жидких веществ / Е.А. Смолькова, **Е.И. Тренкаль** // *Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции: в 2 ч.* – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 132–134.

21. **Тренкаль Е.И.** Анализ волновых процессов в устройствах на основе нерегулярных линий с произвольной зависимостью первичных параметров от продольной координаты, содержащих сосредоточенные неоднородности / Е.И. Тренкаль // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУРа: в 2 ч.* – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 110–114.