

На правах рукописи



Румянцев Сергей Сергеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА
ПЕРВОГО КОНТУРА ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Научная специальность:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»)

- Научный руководитель: **Корячко Вячеслав Петрович**
Заведующий кафедрой САПР ВС, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты: **Седых Ирина Александровна**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных систем управления
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет»
- Минаев Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры специальных информационных технологий учебно-научного комплекса информационных технологий, Московский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя
- Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»** (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования)

Защита состоится 20 ноября 2025 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.326.08 в РТУ МИРЭА по адресу: проспект Вернадского, 78, Д-121.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РТУ МИРЭА и на официальном сайте университета mirea.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.326.08
кандидат технических наук, доцент

Е.Г. Андрианова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Безопасность эксплуатации является безусловным и абсолютным приоритетом в ядерной энергетике, а также персональной ответственностью каждого причастного к процессу прямо или косвенно, поэтому важнейшим направлением работы является минимизация человеческого фактора и разработка инновационных технологий, приводящих к повышению надежности функционирования объектов ядерной энергетике.

В водно-водяных ядерных реакторах, которые наиболее распространены в настоящее время, в качестве теплоносителя первого контура применяется специально подготовленная дистиллированная вода. Обеспечение эффективного теплообмена требует нагрева воды до высокой температуры, что в свою очередь связано с необходимостью поддержания достаточного давления в первом контуре, причем возможны существенные колебания перечисленных параметров. Поддержание теплового режима ядерных энергетических установок (ЯЭУ) связано с применением специальных конструктивных мер, в том числе резервуаров компенсирующих температурное расширение теплоносителя - компенсаторами объема. При этом уровень дистиллированной воды в компенсаторе объема должен подвергаться непрерывному контролю, который необходимо осуществлять в автоматическом режиме.

В случае первого контура ЯЭУ, датчики, контролирующие режим работы, находятся в экстремальных условиях, под воздействием температуры, давления, вибрации и высокого уровня радиации. Кроме того, часто отсутствует техническая возможность их ремонта и замены, что делает измерение уровня теплоносителя неординарной задачей.

Одним из устройств контроля уровня, способных функционировать в тяжелых условиях первого контура ЯЭУ являются импульсные рефлектметрические уровнемеры. Их применение в данном случае требует специальных конструктивных решений, поэтому построение математических моделей, позволяющих прово-

доть, с применением имитационного и компьютерного моделирования, комплексное исследование импульсных рефлектометрических уровнемеров первого контура ЯЭУ является актуальной задачей для атомной энергетики.

Степень разработанности темы. Импульсный рефлектометрический уровнемер, работающий по технологии TDR, способен провести измерение уровня жидкостей или сыпучих материалов, а также измерить толщину слоёв многофазных сред в широких пределах. Эти устройства имеют достаточно простую конструкцию чувствительного элемента, вследствие чего характеризуются высокой надёжностью и длительным сроком эксплуатации. Значительный вклад в развитие теории импульсной рефлектометрии внесли Е.И. Тренкаль, А.Г. Лоцилов, В. Дьяконов, Д. Батлинг. Следует также отметить российских и зарубежных учёных, внесших существенный вклад в развитие вычислительной математики: Н.С. Бахвалов, А.О. Гельфонд, Б.Г. Галеркин, С.К. Годунов, А.А. Дородницын, Л.В. Канторович, А.Н. Крылов, Р. Курант, К. Ланцош, Г. Леви, Г.И. Марчук, Р.Д. Рихтмайер, А.А. Самарский, Дж. Скарборо, А.Н. Тихонов, К. Фридрихе и других.

В настоящее время импульсные рефлектометрические уровнемеры различного назначения серийно производятся рядом российских компаний, в том числе известны такие марки, как Ризур, MicroTREK, ТЭКФЛЕКС, OPTIFLEX, предназначенные для эксплуатации в пищевой, нефтегазовой и химической промышленности, в том числе в сжиженном газе, высококоррозионных и вязких жидкостях, а также для порошков и гранул.

Отдельно стоит выделить уровнемеры КУРС, производимые компанией АО "Моринформсистемы Агат-КИП" для установки и эксплуатации в резервуары первого контура ЯЭУ.

В зависимости от способа конструктивного исполнения, в роли чувствительного элемента выступают коаксиальная линия, стержень или трос. При этом длина коаксиальной линии как правило ограничена 6 метрами, в то время как тросы применяют для измерения уровня в диапазоне до 30 метров и более. К достоинствам стоит отнести возможность удаления электронного блока на

значительное расстояние от точки, где производится установка датчика, что позволяет эксплуатировать импульсные рефлектометрические уровнемеры в широком диапазоне температур измеряемой среды, от -200°C до 450°C и давлении до 35 МПа. Эти особенности позволяют применять их в ЯЭУ, в том числе в первом контуре водно-водного ядерного реактора.

Объектом исследования являются процессы формирования эхо-сигнала в импульсном рефлектометрическом уровнемере, предназначенном для эксплуатации в первом контуре ЯЭУ.

Предмет исследования. Численные методы анализа математических моделей импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ЯЭУ и комплексный анализ на их основе в интересах улучшения существующих измерительных систем, применительно к ядерной энергетике.

Цель работы и основные задачи. Цель работы – разработка формализованного описания математических моделей и численных методов анализа в интересах проведения комплексного исследования процессов формирования эхо-сигнала импульсного рефлектометрического уровнемера.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать формализованное описание математической модели СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера, учитывающую его конструктивные особенности, применительно к условиям эксплуатации в первом контуре ЯЭУ.

2. Исследовать возможности модернизации процесса калибровки чувствительного элемента, с использованием полученной математической модели.

3. Исследовать возможность использования чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера в качестве дополнительного датчика температуры внутри первого контура ядерного реактора. Используя численные методы и формализованную математическую модель провести анализ и дать рекомендации по градуировке датчика.

4. Разработать программы компьютерного моделирования для проведения численного анализа в рамках комплексного исследования свойств импульсного рефлектометрического уровнемера.

Научная новизна. В ходе настоящей работы получены следующие научные результаты:

1. Создано формализованное описание математической модели СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера, отличием которого является функционирование в условиях первого контура ЯЭУ, наличие чувствительного элемента, представляющего собой жесткую фазостабильную коаксиальную линию, которая позволяет выполнить математическое моделирование, с использованием сред динамического моделирования, таких как Matlab Simulink, LabView, SiminTech, VisSim и других, использующих запись процесса в виде блок-диаграмм.

2. Проведено комплексное исследование процесса калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера, позволившее разработать методику калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ЯЭУ отличающуюся видом реперных меток и обеспечивающую коррекцию погрешности в автоматическом режиме. Техническое решение обладает научной новизной и защищено патентом на изобретение №2810705 "Рефлектометрический уровнемер" от 03 октября 2023 года.

3. Предложен способ использования импульсного рефлектометрического уровнемера для измерения температуры теплоносителя в первом контуре ЯЭУ с реактором типа ВВРД, который позволяет дать рекомендации по построению градуировочной кривой для различных поддиапазонов значений температуры.

4. Разработан алгоритм получения оптимальной, по критерию минимума квадрата ошибки, аппроксимации экспериментальной зависимости температуры от относительной диэлектрической проницаемости теплоносителя, с использованием численных методов, обеспечивающий построение градуированных зависимостей температуры от относительной диэлектрической проницаемости.

5. На основе анализа математических моделей процессов формирования эхо-сигнала разработан комплекс программ для компьютерного моделирования, в интересах комплексного исследования процессов формирования эхо-сигналов импульсного рефлектометрического уровнемера. Структура программного комплекса включает программы: "Программа для имитации работы импульсного рефлектометрического уровнемера ЯЭУ" и "Оптимизация аппроксимирующей функции по минимуму квадрата ошибок ". Получены авторские свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Практическая значимость работы.

Разработанные математические модели процессов формирования эхо-сигнала применимы к задачам динамического моделирования систем управления и безопасности ядерных энергетических установок. Модель, построенная на основе декомпозиции и реализованная в среде динамического моделирования SiminTech позволяет имитировать прохождение зондирующего сигнала через СВЧ-тракт импульсного рефлектометрического уровнемера, с формированием рефлектограммы. Полученный метод калибровки позволяет повысить энергетическую эффективность и обеспечить точность измерения, сопоставимую с точностью установки реперной метки. Разработанный программный комплекс может быть использован как в научно-исследовательских целях, так и в прикладных задачах.

Внедрение результатов.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты внедрены и применяются в АО "Моринсис-Агат-КИП" для производства уровнемеров серии КРУ, Агат-У и РИС, а также нашли применение в автоматизированной системе контроля параметров осадки океанографического исследовательского судна проекта 22010, на предприятии АО "ПСЗ "Янтарь", что подтверждено актами о внедрении.

Теоретическая значимость.

Разработка математической модели процессов формирования эхо-сигнала в СВЧ-тракте импульсного рефлектометрического уровнемера является вкладом в

развитие теории моделирования динамических систем и систем управления, применительно к ядерным энергетическим установкам.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель процесса формирования эхо-сигнала в СВЧ-тракте импульсного рефлектометрического уровнемера для измерения уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки, построенная на основе декомпозиции на отрезки однородных линий передачи, позволяющая выполнять компьютерное моделирование рефлектограммы с учётом параметров пути прохождения зондирующего импульса. (соответствует п.6 паспорта специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

2. Полученный с использованием разработанной математической модели формирования эхо-сигнала, способ калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера для измерения уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки, на основе протяженных реперных меток, конструкция которых позволяет исключить двойное отражение, что подтверждается комплексными исследованиями. (соответствует п.8 паспорта специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

3. Способ использования чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера в первом контуре ядерной энергетической установки, который позволяет произвести измерение температуры теплоносителя, с применением градуировочной кривой, полученной на основе алгоритма аппроксимации зависимости температуры от относительной диэлектрической проницаемости, с применением численных методов анализа. (соответствует п.8 паспорта специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

Пункты паспорта специальности.

6. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей (технические науки).

8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов достигается корректным применением математических методов и подтверждена сравнительным анализом с данными натурных экспериментов, проводимых в рамках внедрения результатов в производственный процесс АО "Моринформсистемы-Агат-КИП" и сходимостью в частных случаях, опубликованных в различных источниках.

Апробация результатов. Основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

– XIII семинар вузов по теплофизике и энергетике, Нижний Новгород, 12-14 октября 2023г.

– Ежегодная отраслевая молодежная научно-техническая конференция «Инновации молодых – 2023» к 75-летию со Дня основания Санкт-Петербургского морского бюро машиностроения «Малахит»

– Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов Сборник докладов научно-технической конференции АО «Концерн «Моринсис-Агат» 2023г.

– Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов Сборник докладов научно-технической конференции АО «Концерн «Моринсис-Агат» 2024г.

– Новые информационные технологии в научных исследованиях. XXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 22-24 ноября 2023 г.

– VII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2024), Рязань, 4-6 марта 2024г.

– Новые информационные технологии в научных исследованиях. XXIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 28-29 ноября 2024 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 4 в журналах из списка ВАК, 1 патент, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 9 в иных печатных изданиях и сборниках.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка использованных источников и приложений. Общий объём работы составляет 122 страницы, содержащих 35 рисунков и 1 таблицу. Список использованной литературы включает 100 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общие сведения о проблематике исследования, освещена история вопроса. Показана актуальность темы исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

Первая глава диссертации посвящена обоснованию и построению математической модели импульсного рефлектометрического уровнемера ядерной энергетической установки. Обзор существующих серийно производимых импульсных рефлектометрических уровнемеров различного назначения, принцип действия которых основан на технологии TDR. Данные устройства обладают рядом достоинств, в том числе с их помощью возможно измерять уровни жидкости и сыпучих материалов, включая химически агрессивные и коррозионные среды. В качестве чувствительных элементов, в зависимости от требуемой длины и условий эксплуатации, используются гибкие тросы, стержни и фазостабильные коаксиальные линии.

Датчик (первичный преобразователь) исследуемого уровнемера состоит из двух частей: головной части и чувствительного элемента. Чувствительный элемент представляет собой фазостабильный коаксиальный волновод, длиной до 6 м, с закороченным на конце центральным проводником. Конструктивно чувствительный элемент имеет жесткое многосекционное исполнение, для осуществления монтажа датчика в резервуар первого контура при дефиците пространства. Для исключения

влияния высокого давления во внешней трубе чувствительного элемента имеются прорези.

На основе анализа возможных методов математического моделирования было принято решение создавать макромодель СВЧ тракта импульсного рефлектометрического уровнемера, путём декомпозиции его на однородные отрезки, с учётом взаимосвязи сигналов на входе и выходе (рисунок 1).

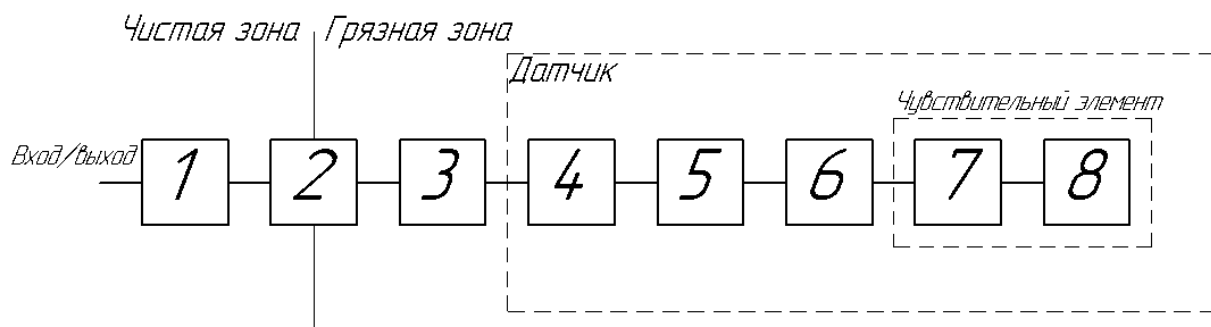


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера

Каждый элемент данной схемы, является отрезком линии оканчивающейся неоднородностью, источником которой служит стык со следующим отрезком линии. При этом каждый i -й отрезок импульсного рефлектометрического уровнемера характеризуется входной a_{exi} и выходной $a_{выxi}$ падающими и входной b_{exi} и выходной $b_{выxi}$ отраженными волнами (рисунок 2).

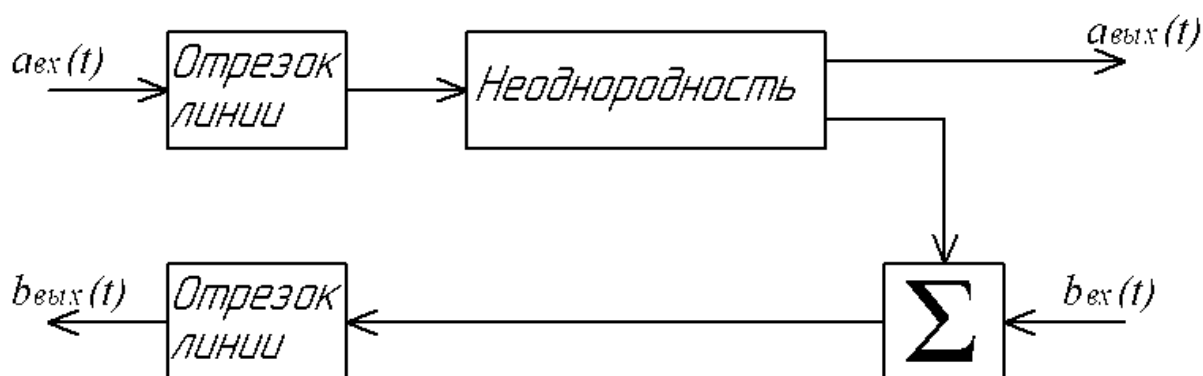


Рисунок 2 – Структурная схема математической модели отрезка линии с неоднородностью на конце

Падающую волну на выходе отрезка $a_{\text{вы}i}$ можно определить, с учётом однократного прохождения со входа на выход, потерь в линии и временной задержки прохождения по формуле:

$$a_{\text{вы}i}(t) = V_{\text{Л}i} T_i a_{\text{вх}i}(t - \tau_i),$$

где $V_{\text{Л}i}$ – коэффициент передачи i -го отрезка импульсного рефлектометрического уровнемера;

T_i – коэффициент прохождения неоднородности на границе раздела i -го и $i+1$ -го отрезка импульсного рефлектометрического уровнемера;

τ_i – задержка распространения сигнала в i -м отрезке импульсного рефлектометрического уровнемера, с.

При определении выходной отраженной волны $b_{\text{вы}i}$ следует учесть отраженную часть волны $a_{\text{вх}i}$, а также входную отражённую волну $b_{\text{вх}i}$. В этом случае, без учета вторичных переотражений выходная отражённая волна i -го отрезка уровнемера будет состоять из суммы отраженной части падающей волны $a_{\text{вх}i}$ вернувшейся на вход отрезка и отраженной волны $b_{\text{вх}i}$, с учётом коэффициента прохождения и затухания в линии:

$$b_{\text{вы}i}(t) = V_{\text{Л}i}^2 R_i a_{\text{вх}i}(t - 2\tau_i) + V_{\text{Л}i} T_i b_{\text{вх}i}(t - \tau_i),$$

где R_i – коэффициент отражения неоднородности на границе раздела i -го и $i+1$ -го отрезка импульсного рефлектометрического уровнемера.

Таким образом, в результате формальных рассуждений были получены соотношения, являющиеся математической моделью однородного отрезка уровнемера, связывающие падающие и отраженные волны на входе и выходе отрезка линии с неоднородностью на конце:

$$\begin{cases} a_{\text{вы}i}(t) = V_{\text{Л}i} T_i a_{\text{вх}i}(t - \tau_i) \\ b_{\text{вы}i}(t) = V_{\text{Л}i}^2 R_i a_{\text{вх}i}(t - 2\tau_i) + V_{\text{Л}i} T_i b_{\text{вх}i}(t - \tau_i) \end{cases}$$

Модель позволяет провести комплексный анализ, с учётом функционирования импульсного рефлектометрического уровнемера с учётом широкого диапазона

рабочих температур первого контура ЯЭУ, что является отличительной особенностью предлагаемого уровнемера от содержащихся в обзоре. Подробно описанная конструкция учитывает возможную специфику условий эксплуатации, на основании чего можно построить, с учётом полученной модели однородного отрезка – обобщённую компьютерную модель всего СВЧ тракта в сборе и провести его анализ без учёта вторичных переотражений на стыках неоднородностей.

Во второй главе исследован вопрос калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера в первом контуре ядерной энергетической установки.

При эксплуатации чувствительный элемент делится на затопленную часть длиной l_3 и незатопленную l_{H3} , длины затопленного и незатопленного отрезков можно определить по формулам:

$$l_3 = \tau_3 \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_3}},$$

$$l_{H3} = \tau_{H3} \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{H3}}},$$

где τ_3 – время прохождения затопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, с; τ_{H3} – время прохождения незатопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, с; ε_3 ε_{H3} – относительные диэлектрические проницаемости затопленного и незатопленного участков чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера.

Истинные длины затопленного l_3^* и незатопленного l_{H3}^* участков чувствительного элемента отличаются от измеренных, так как расчётные диэлектрические проницаемости затопленного ε_3^* и незатопленного ε_{H3}^* участков тоже отличны от реальных. Погрешность измерения длин затопленного Δl_3^* и незатопленного Δl_{H3}^* участков составит:

$$\Delta l_3 = |l_3 - l_3^*|$$

$$\Delta l_{H3} = |l_{H3} - l_{H3}^*|.$$

Если разместить две реперные метки, так, чтобы первая отставала от изолятора в начале чувствительного элемента на длину l_1 , а вторая от короткого замыкания в конце чувствительного элемента на длину l_2 , в результате:

$$l_3 = \tau_3 v_3^* = \tau_3 \frac{l_2}{\tau_2}$$

$$l_{H3} = \tau_{H3} v_{H3}^* = \tau_{H3} \frac{l_1}{\tau_1}$$

Предложена конструкция реперных меток, позволяющая избежать двойного отражения (рисунки 3, 4)

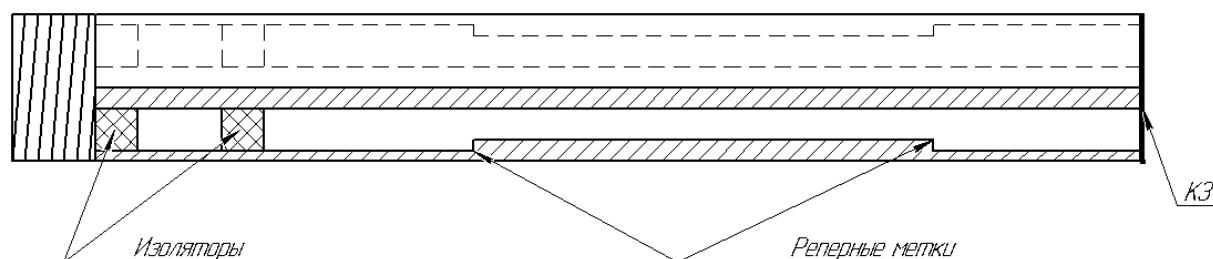


Рисунок 3 – Реперная метка в виде сплошного сужения внутреннего диаметра корпуса чувствительного элемента

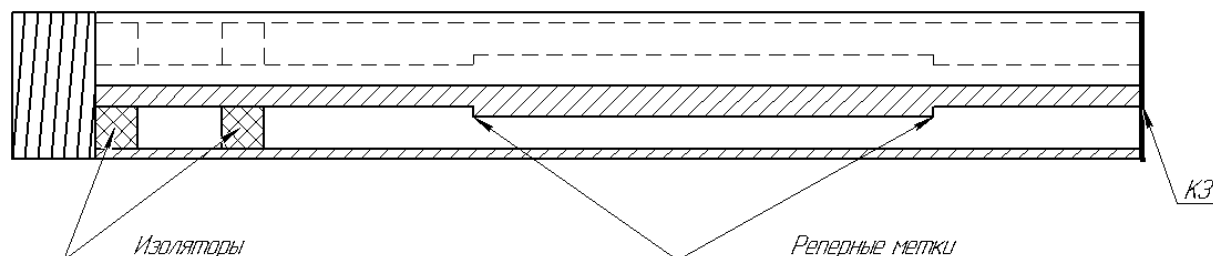


Рисунок 4 – Реперная метка в виде сплошного расширения внешнего проводника

Техническое решение обладает научной новизной и на него был получен патент на изобретение №2810705 "Рефлектометрический уровнемер" от 03 октября 2023 года. Результатом использования данного метода калибровки является компенсация влияния колебаний температуры и давления на относительную диэлектрическую проницаемость теплоносителя и сухого пара в ёмкости первого контура ЯЭУ.

В третьей главе предложена методика измерения температуры теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки методом импульсной рефлектометрии. В основе лежит зависимость относительной диэлектрической

проницаемости от температуры, на основе которой можно получить калибровочную кривую $T(\varepsilon) = f(\varepsilon)$ (рисунок 5)

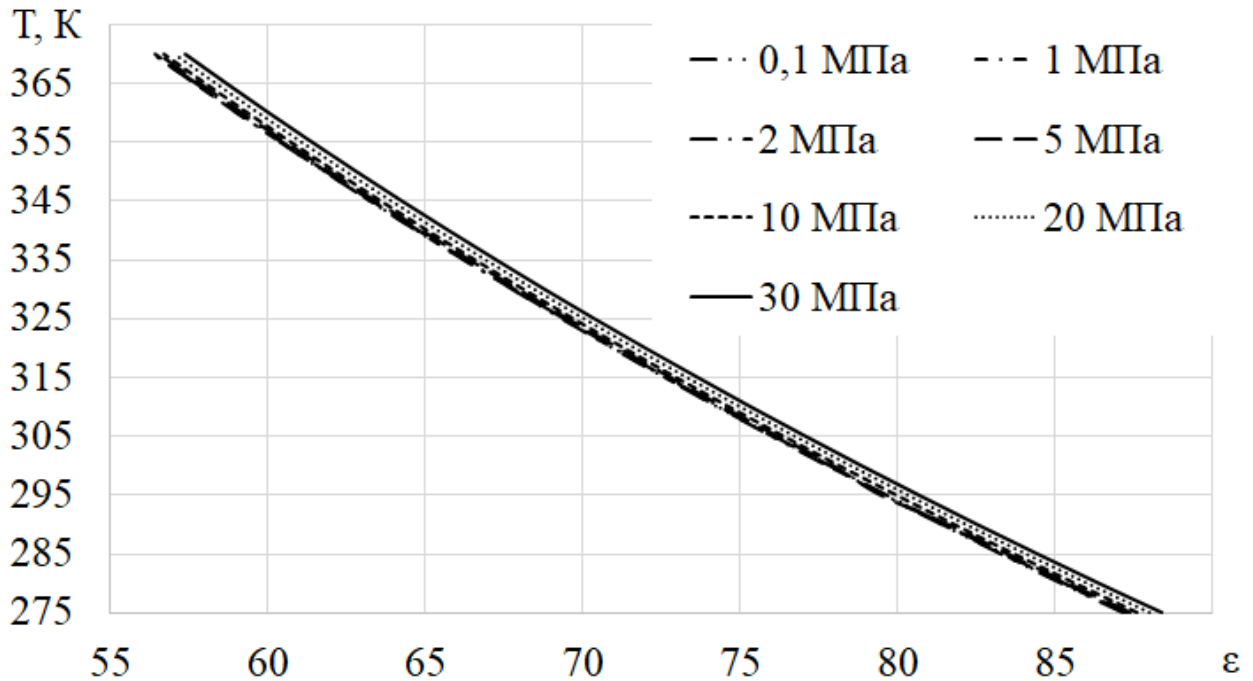


Рисунок 5 – Зависимость температуры теплоносителя (дистиллированной воды) от относительной диэлектрической проницаемости при различном давлении.

Отсутствие перегибов в зависимостях на рисунке 5 позволяет говорить о целесообразности аппроксимации полиномом второй степени:

$$T = a + b\varepsilon + c\varepsilon^2.$$

Нахождение коэффициентов a , b и c производится путём согласования аппроксимированной кривой с усреднённой экспериментальной зависимостью в трёх точках. Для этого необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_1 & \varepsilon_1^2 \\ 1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_2^2 \\ 1 & \varepsilon_3 & \varepsilon_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}$$

Первая точка выбирается в начале кривой $T_1 = 275\text{K}$, $\varepsilon_1 = 87,4167$. Третья точка соответствует окончанию усреднённой зависимости $T_3 = 625\text{K}$, $\varepsilon_3 = 13,62$.

Выбор промежуточной точки (T_2, ε_2) осуществляется исходя из критерия минимума средней квадратичной ошибки (MSE):

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T - T)^2},$$

где T – значение температуры измеренное экспериментально, К;

N – число измерений.

В результате выражение принимает вид

$$\begin{bmatrix} 1 & 87,4167 & 87,4167^2 \\ 1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_2^2 \\ 1 & 13,62 & 13,62^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 275 \\ T_2 \\ 625 \end{bmatrix},$$

а задача нахождения коэффициентов a , b и c решается путём поиска оптимальной промежуточной точки (T_2, ε_2) , с учётом требования минимизации MSE.

Эмпирическое выражение для калибровочной кривой, с учётом коэффициентов a , b и c , найденных путём решения СЛАУ, имеет вид:

$$T = 736,5704 - 8,729\varepsilon + 0,0395\varepsilon^2.$$

Кроме того проведён сравнительный полученной аппроксимирующей зависимостей по критерию минимума средней квадратичной ошибки (MSE), с другими видами аппроксимации: экспоненциальной и показательной. В случае аппроксимации эмпирической зависимости полиномом второй степени, средний квадрат ошибки равен $MSE = 3,703$. Использование аппроксимаций экспоненциальной и показательной функциями позволяет получить $MSE = 7,306$ и $MSE = 19,934$ соответственно. В результате можно сделать вывод о том, что аппроксимация полиномом второй степени по трём точкам, с оптимизацией промежуточной точки согласно выражению приводит к наиболее точному результату среди рассмотренных видов аппроксимации.

В четвертой главе построен программный комплекс компьютерного моделирования импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ЯЭУ.

Отрезок линии показанный на рисунке 2 был построен с использованием стандартных инструментов и библиотек среды моделирования SimInTech (рисунок 6).

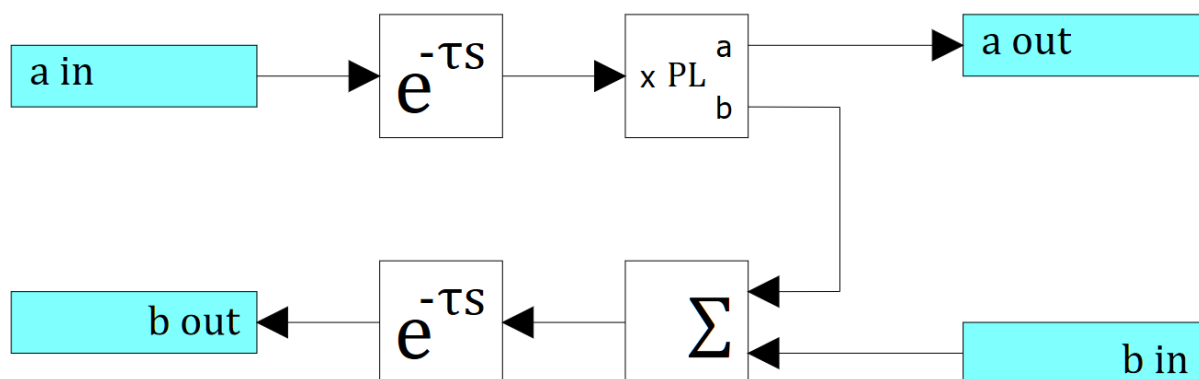


Рисунок 6 – Модель отрезка линии с неоднородностью на конце построенная в среде динамического моделирования SimInTech

Параметры модели рассчитываются автоматически, через скрипт в соответствующем окне рабочего стола SimInTech. Компьютерная модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера показана на рисунке 7

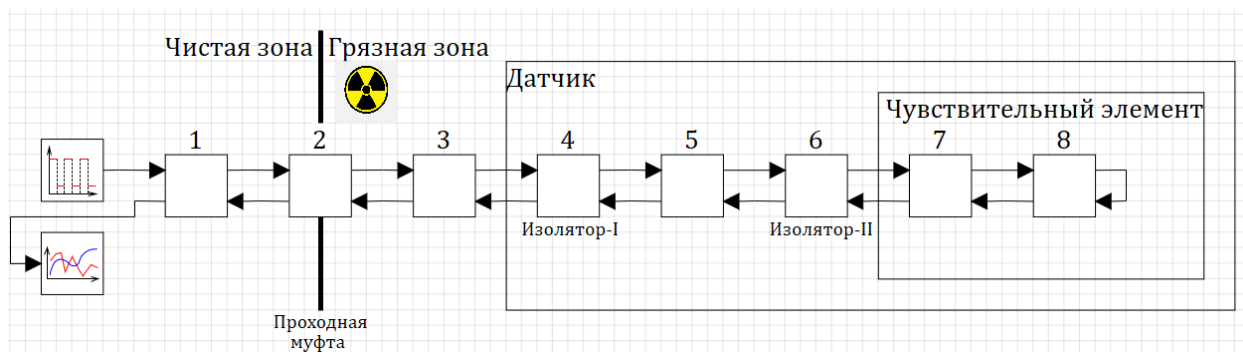


Рисунок 7 – Модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера в среде динамического моделирования SimInTech

Достоинствами данного подхода можно назвать:

1. Интуитивно понятная модель (работать с ней может неопытный пользователь, не изучавший SimInTech ранее, но имеющий инструкцию к модели);
2. Гибкость (возможность добавления новых элементов в тракт, для изменения конфигурации тракта или уточнения модели);

3. Универсальность (SimInTech уже используется в системах динамического моделирования АЭС).

В результате работы создан комплекс программ для анализа импульсного рефлектометрического уровнемера, а именно:

– " Программа для имитации работы импульсного рефлектометрического уровнемера ЯЭУ ", построенная в среде динамического моделирования SimInTech, используемой для моделирования систем управления АЭС;

– "Оптимизация аппроксимирующей функции по минимуму квадрата ошибок ", написанная на языке GNU Octave.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были получены следующие результаты:

1. Выполнен обзор серийно производимых импульсных рефлектометрических уровнемеров, работающих по технологии TDR и предназначенных для измерения уровня жидкости и сыпучих материалов. Классифицированы типы чувствительных элементов, применяемых в устройствах данного типа. На основании обзора можно обобщить и дать рекомендации по использованию различных типов чувствительных элементов, в зависимости от условий эксплуатации, предела измеряемого уровня и агрессивности измеряемой среды.

2. Построена математическая модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ЯЭУ, на основе декомпозиции в виде отрезков однородных линий, в том числе чувствительного элемента. Полученная модель позволяет выполнить математическое моделирование, с использованием сред динамического моделирования, таких как Matlab Simulink, LabView, SiminTech, VisSim и другие, использующие блоковую систему представления алгоритмов и процессов.

3. Проведено комплексное исследование процесса калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера, выполненное на основе математической модели. В результате предложено техническое решение, позволяющее выполнять калибровку импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ЯЭУ,

позволяющее производить коррекцию погрешности в автоматическом режиме, не прерывая работу устройства. Техническое решение обладает научной новизной и на него был получен патент на изобретение №2810705 "Рефлектометрический уровнемер" от 03 октября 2023 года.

4. Был предложен способ применения импульсного рефлектометрического уровнемера для измерения температуры теплоносителя в первом контуре ЯЭУ с реактором типа ВВРД. Даны рекомендации и построен алгоритм получения оптимальной, по критерию минимума квадрата ошибки, аппроксимации экспериментальной зависимости температуры от относительной диэлектрической проницаемости теплоносителя, с использованием численных методов, в интересах построения градуировочной кривой для различных поддиапазонов значений температуры и даны рекомендации по повышению точности измерения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Румянцев С.С., Корячко В.П., Аронов Л.В. Математическая модель рефлектометрического уровнемера для измерения уровня воды в контуре ядерной энергетической установки //Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2023. Вып. 2 (84). С. 157-165. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-157-165

2. Румянцев С.С. Имитационное моделирование калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера с помощью реперных меток [Текст] // Цифровая обработка сигналов – 2023. – № 2. – с. 64-69.

3. Румянцев С.С. Измерение температуры воды методом импульсной рефлектометрии в первом контуре ядерной энергетической установки //Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2024. Вып. 1 (87). С. 121-127. DOI: 10.21667/1995-4565-2024-87-121-127

4. Румянцев С.С. Компьютерное моделирование в проектировании рефлектометрического уровнемера для измерения уровня воды в контуре ядерной энергетической установки / С.С.Румянцев // Вестник

РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2025. Вып. 1 (91). С. 143-147. DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-143-147

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и патенты:

5. Пат. RU2810705C1 Российская Федерация, G01F 23/284. Рефлектометрический уровнемер / Л.В. Аронов, А.М. Орлов, С.С. Румянцев.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Моринформсистема-Агат-КИП" (RU). – № 2810705C1; заявл. 03.10.2023 ; опубл. 28.12.2023, Бюл. № 1.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668973 Программа для имитации работы импульсного рефлектометрического уровнемера ЯЭУ / Аронов Л. В., Румянцев С.С. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» . – Заявка № 2024663013, дата поступления. 06 июня 2024 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13 августа 2024 г.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668440 Оптимизация аппроксимирующей функции по минимуму квадрата ошибок / Аронов Л. В., Румянцев С.С.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» . – Заявка № 2024666822, дата поступления. 22 июля 2024 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 07 августа 2024 г.

Работы, опубликованные в других изданиях:

8. Румянцев С.С. Измерение уровня воды в контуре ядерной энергетической установки рефлектометрическим методом [Текст] / С.С. Румянцев // Информационные технологии в прикладных исследованиях, межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2023. – с. 201-206

9. Румянцев С.С. Термометрия в первом контуре ядерной энергетической установки рефлектометрическим методом [Текст] / С.С. Румянцев // Информационные технологии в конструировании ЭС, межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2024. – с. 193-197

10. Румянцев С.С. Особенности применения технологии TDR в первом контуре ядерной энергетической установки / С.С. Румянцев // XIII семинар вузов по теплофизике и энергетике: тезисы докладов Всероссийской научной конференции [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2023.

11. Румянцев С.С. Измерение уровня теплоносителя в компенсаторе объема судовой ядерной энергетической установки методом импульсной рефлектометрии / С.С. Румянцев // Состояние, проблемы и перспективы разработки корабельных информационно-управляющих комплексов. Сборник докладов научно-технической конференции АО «Концерн «Моринсис-Агат». – М.: АО «Концерн «Моринсис-Агат», 2023, 136 с.

12. Румянцев С.С. Математическая модель рефлектометра для измерения уровня воды в контуре ядерной энергетической установки / С.С. Румянцев // Состояние, проблемы и перспективы разработки корабельных информационно-управляющих комплексов. Сборник докладов научно-технической конференции АО «Концерн «Моринсис-Агат». – М.: АО «Концерн «Моринсис-Агат», 2024, 136 с.

13. Румянцев С.С. Способ измерения температуры воды в первом контуре судовой ядерной энергетической установки методом импульсной рефлектометрии / С.С. Румянцев // Морской вестник, №1(17) – 2024. – с.60-61

14. Румянцев С.С. Измерение температуры воды методом импульсной рефлектометрии в диапазоне от 275 до 370 К / С.С. Румянцев // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024 [текст]: сб. тр. VII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2024. – с. 184-188

15. Румянцев С.С. Измерение температуры воды методом импульсной рефлектометрии / С.С. Румянцев // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 2023 г. – с. 207-208

16. Румянцев С.С. Математическое моделирование в проектировании импульсного рефлектометрического уровнемера для ядерной энергетической установки / С.С. Румянцев // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. ИП Коняхин А.В., 2024 – 208 с.