

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновационной деятельности

«Пензенского государственного
университета»

С.М. Васин

«26» сентября 2025г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"

на диссертацию Румянцева Сергея Сергеевича

на тему «Математическое моделирование в проектировании
импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ядерной
энергетической установки», представленную на соискание
учёной степени кандидата технических наук по специальности

1.2.2. Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Актуальность темы работы.

Диссертационное исследование посвящено актуальной научно-технической задаче — повышению достоверности и помехоустойчивости измерений уровня теплоносителя в первом контуре ядерных реакторов в судовых ядерных энергетических установках (ЯЭУ). В условиях высоких температур, экстремального радиационного фона и ограниченного доступа традиционные контактные методы измерения уровня теряют свою эффективность. Применение импульсных рефлектометрических уровнемеров с последующей цифровой обработкой сигнала представляет собой перспективное направление, требующее глубокой проработки алгоритмического обеспечения. Построение математических моделей подобных измерительных систем позволяет проводить динамическое моделирование работающей системы безопасности ЯЭУ, а также может быть использовано для проектирования импульсных рефлектометрических уровнемеров. Тема диссертации является актуальной и значимой для развития отечественных морских атомных технологий.

Содержание работы.

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

Во введении приведён краткий обзор темы исследований, перечислены научные задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, и научная новизна.

Первая глава посвящена разработке математической модели импульсного рефлектометрического уровнемера для ядерной энергетической установки, основанного на технологии TDR (рефлектометрия во временной области). Проведён обзор промышленных аналогов, выявлены их достоинства — возможность измерения уровня в агрессивных и коррозионных средах с использованием различных типов чувствительных элементов: тросов, стержней и фазостабильных коаксиальных линий. Исследуемый датчик состоит из головной части и жёсткого многосекционного чувствительного элемента длиной до 6 м, выполненного в виде коаксиального волновода с закороченным концом, что обеспечивает надёжность в условиях высокого давления, температуры и радиации первого контура ЯЭУ. Для снижения влияния перепада давлений в конструкции предусмотрены прорези.

Обоснован выбор макроуровневого подхода к моделированию СВЧ-тракта путём декомпозиции на однородные отрезки, каждый из которых описывается параметрами: коэффициентами передачи, отражения и прохождения, а также временной задержкой сигнала. Построена структурная схема модели, связывающая падающие и отражённые волны на входе и выходе каждого отрезка с учётом неоднородностей на стыках. Получены аналитические выражения, описывающие распространение сигнала и формирование рефлектограммы. Модель учитывает изменения диэлектрической проницаемости среды при колебаниях температуры и давления, что позволяет проводить анализ работы уровнемера в реальных условиях эксплуатации.

Вторая глава посвящена исследованию проблемы калибровки импульсного рефлектометрического уровнемера, применяемого в условиях первого контура ядерной энергетической установки, где на точность измерений влияют изменения температуры и давления, вызывающие колебания относительной диэлектрической проницаемости теплоносителя (воды) и пара. Это приводит к изменению скорости распространения зондирующего импульса и, как следствие, к погрешности определения уровня. Для решения этой задачи предложен метод автоматической калибровки на основе использования двух реперных меток, расположенных в незатопленной и затопленной частях чувствительного элемента.

Особое внимание уделено конструкции реперных меток: предложены протяжённые неоднородности в виде сужения внешнего проводника или расширения внутреннего, что исключает эффект двойного отражения и повышает точность обработки рефлектограммы. Техническое решение обладает научной новизной и защищено патентом РФ №2810705 на изобретение "Рефлектометрический уровнемер" от 03 октября 2023 года. Метод позволяет эффективно нивелировать влияние изменений температуры и давления на результаты измерений в широком диапазоне.

Третья глава содержит предложения по измерению температуры теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки с помощью импульсной рефлектометрии. Основой метода является известная зависимость относительной диэлектрической проницаемости воды от температуры, которая позволяет косвенно определять температуру по измеряемому рефлектометром значению диэлектрической проницаемости. На основе экспериментальных данных построена градуировочная кривая, связывающая температуру и диэлектрическую проницаемость при различных давлениях. Проведено сравнение полиномиальной аппроксимации с экспоненциальной и показательной. Установлено, что полином второй степени даёт наименьшую среднюю квадратичную ошибку, что подтверждает его преимущество для построения калибровочной характеристики.

В четвертой главе разработан программный комплекс для компьютерного моделирования импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ядерной энергетической установки. Модель построена в среде SimInTech с использованием стандартных блоков и библиотек, что обеспечивает удобство работы. Каждый отрезок СВЧ-тракта с неоднородностью реализован в виде функциональной подсистемы, параметры которой рассчитываются автоматически через встроенный скрипт. Полная модель СВЧ-тракта позволяет получать рефлектограммы с учётом отражений от структурных элементов (изоляторы, муфты, реперные метки) и оценивать влияние изменений уровня теплоносителя. Преимущества подхода – интуитивность, гибкость в изменении конфигурации тракта и универсальность за счёт использования SimInTech, применяемой в АЭС. В состав комплекса входят: программа имитации работы уровнемера в SimInTech и скрипт на языке GNU Octave для оптимизации аппроксимирующей функции по критерию минимума среднеквадратичной ошибки.

Приложения содержат акты о внедрении результатов диссертационной работы, патент, листинги разработанных программ

Анализ текста диссертации позволяет сделать вывод, что содержание работы соответствует заявленной теме. Диссертация является законченно научной квалификационной работой, решающей актуальные научно-технические задачи цифрового спектрального анализа. Область работы соответствует пунктам паспорта ВАК специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

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

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

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ВАК к его оформлению и структуре.

Научная новизна, сформулированная в основных положениях, выносимых автором на защиту, состоит в следующем:

- разработана формализованная математическая модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера для условий первого контура ЯЭУ с жестким фазостабильным коаксиальным чувствительным элементом, реализуемая в средах блок-диаграммного моделирования (SimInTech, MATLAB и др.).

- предложена методика калибровки уровнемера по реперным меткам, обеспечивающая автоматическую коррекцию погрешности, вызванной изменением диэлектрической проницаемости теплоносителя. Техническое решение запатентовано (патент №2810705).

- обоснован способ измерения температуры теплоносителя в первом контуре ЯЭУ по данным рефлектометрии на основе зависимости диэлектрической проницаемости воды от температуры.

- разработан алгоритм оптимизации аппроксимации экспериментальной зависимости «температура — диэлектрическая проницаемость» по критерию минимума среднеквадратичной ошибки.

- создан программный комплекс для моделирования процессов формирования эхо-сигнала, включающий программу имитации работы уровнемера и программу оптимизации градуировочной зависимости. Программы зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ.

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.

Результаты работы рекомендованы к применению для:

- проектирования и расчёта режимов работы импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ядерной энергетической установки;

- анализа рефлектограмм с использованием разработанных компьютерных моделей, при различных исходных данных;

- внедрению в учебный процесс в технических ВУЗах по соответствующим дисциплинам.

Практическая ценность диссертационной работы подтверждается актами о внедрении полученным от АО «Моринсис-Агат-КИП», и АО «ПСЗ "Янтарь».

Достоверность результатов диссертации подтверждается

- корректным применением математического аппарата;
- сравнительным анализом с данными натурных экспериментов;
- сходимостью в частных случаях, опубликованных в различных научно-технических источниках.

Можно отметить следующие **недостатки** диссертационной работы.

1. Предложенный способ калибровки, несомненно, обладает научной новизной, однако его преимущества недостаточно раскрыты и проиллюстрированы в тексте диссертационной работы.

2. Предложенный метод измерения температуры путём косвенной оценки относительной диэлектрической проницаемости не может заменить существующие методы и имеет относительно большую погрешность. Было бы целесообразно построить градуировочные кривые для отдельных участков рабочего диапазона температур.

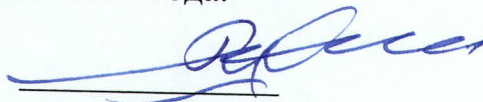
3. Предложенный программный комплекс выполнен в виде двух отдельных программ в принципиально разных средах программирования и несмотря на то, что логическая взаимосвязь между ними присутствует, вопрос сопряжения программ не раскрыт.

4. В третьей главе представлен анализ нескольких видов аппроксимации для построения градуировочной кривой, однако подробно рассмотрена только аппроксимация параболой. Проигнорирован вопрос аппроксимации путём сплайн-интерполяции.

Однако, несмотря на указанные выше недостатки, следует констатировать, что автор успешно продемонстрировал научную новизну и практическую значимость полученных результатов. Диссертационная работа Румянцева Сергея Сергеевича «Математическое моделирование в проектировании импульсного рефлектометрического уровнемера первого контура ядерной энергетической установки» является законченной научной квалификационной работой, которая по критериям актуальности, научной новизны, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, и достоверности полученных результатов соответствует требованиям постановления №842 «О порядке присуждения учёных степеней» от 24 сентября 2013 г. Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемых к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор Румянцев Сергей Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа, автореферат и отзыв на работу рассмотрены и одобрены на заседании кафедры Конструирование и производство радиоаппаратуры (КиПРА) ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», протокол № 4 от 05 апреля 2018 года.

Юрков Николай Кондратьевич



доктор технических наук (05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (связь)), профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Федерального

государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет»

Сведения о составителе отзыва:

Фамилия, имя, отчество: Юрков Николай Кондратьевич

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: профессор

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет».

Должность: заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры».

Почтовый адрес: 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40.

Телефон: +7(412) 36-82-12 E-mail: yurkov_nk@mail.ru