

УДК 621.372

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В КОНТУРЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

С. С. Румянцев, начальник отдела обеспечения ГОЗ АО «Моринсис-Агат-КИП», Рязань, Россия; orcid.org/ 0009-0006-6102-3902, R0806rus@yandex.ru

Построена математическая модель импульсного рефлектометрического уровнемера, предназначенного для измерения уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки с учётом неоднородности в СВЧ-тракте. Разработанная модель реализована программно, с использованием языка программирования SimInTech в виде блок-схемы, состоящей из субмоделей. На основе реализованной математической модели проведены исследования импульсного рефлектометрического уровнемера и получены рефлектограммы при различных начальных условиях.

Целью данной работы является построение элементов программного комплекса на основе математической модели импульсного рефлектометрического уровнемера судовой ЯЭУ с учётом специфики и конструктивных особенностей.

Ключевые слова: рефлектометрический уровнемер, импульсный рефлектометр, математическая модель, ядерная энергетическая установка, компьютерная модель, SimInTech.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-143-147

Введение

Технология импульсной рефлектометрии широко распространена и обычно применяется для тестирования и контроля кабельного оборудования. Принцип действия основан на технологии рефлектометрии во временной области TDR (Time Domain Reflectometry) – эффекте отражения сигнала от неоднородности в кабельной линии, при известной скорости распространения электромагнитных волн. Определить точное расстояние до неоднородности позволяет учёт коэффициента замедления [1]. В импульсном рефлектометрическом уровнемере, применяемом в судовых ядерных энергетических установках (ЯЭУ), неоднородностью является граница раздела сред в чувствительном элементе, представляющем собой жесткую фазостабильную коаксиальную линию. В отличие от механического метода в рефлектометрическом уровнемере отсутствуют подвижные части, что делает его надёжным и долговечным [2].

При использовании в резервуарах первого контура судовой ЯЭУ импульсного рефлектометрического уровнемера необходимо учесть особенности, которые связаны с экстремальными условиями эксплуатации: высокая радиация, переменные температурные режимы, давление и вибрационные нагрузки. Также необходимо обеспечить герметизацию в условиях высоких температур и давления, а узел герметизации должен обеспечивать проведение зондирующего сигнала в чувствительный элемент, расположенный внутри первого контура и передачу отраженного эхо-сигнала в обратном направлении [3].

Учитывая сложность устройства и сферу применения, исключающую возможность ремонта и замены в процессе эксплуатации, в процессе проектирования использовать подробные математические модели, корректно отражающие процессы, происходящие внутри исследуемого объекта, в данном случае импульсного рефлектометрического уровнемера. Для практической реализации моделей разрабатываются комплексы прикладных программ с возможностью доработки и интегрирования в более крупные системы.

Программный комплекс для имитации функционирования импульсного рефлектометрического уровнемера

Математическая модель импульсного рефлектометрического уровнемера, подробно описанная в работе [3], предполагает декомпозицию устройства на субмодели, которые с точки зрения физики представляют собой отрезки коаксиальной линии передачи с неоднородностью на конце. В таком виде можно представить втулки, изоляторы, проходные муфты, а также непосредственно чувствительный элемент, при этом причиной неоднородности выступает место стыковки отрезков коаксиальных линий и разное волновое сопротивление.

Являясь сложной системой, импульсный рефлектометрический уровнемер описывается математическими моделями, и в интересах компьютерной реализации для достижения максимальной эффективности моделирования, а также расчётов его параметров и имитации протекающих процессов в различных ситуациях нужно выбрать способ программной реализации. Сделать это возможно несколькими способами:

1) использовать специализированные средства автоматизированного проектирования (САПР), например Microwave office, Microcap;

2) использовать среды динамического моделирования, такие как Matlab Simulink, LabView, SiminTech и другие;

3) применять прикладные специализированные математические программы, например Matlab, Octave, Mathcad и т.д.

Работа со специализированными САПР описана в ряде литературных источниках, например [4, 5]. К их достоинствам относятся приспособленность к решению задач схемотехнического моделирования, обширный функционал, вывод данных в понятной пользователю форме. Однако владение ими требует навыков, а часто – специального обучения.

Динамические среды моделирования позволяют выполнить визуальное представление модели в виде блок-схемы с математическими связями [6]. Эти среды обладают гибкостью и возможностью учитывать дополнительные связи, а также модифицировать систему в целом при коррекции математической модели. Они относительно просты в освоении для неопытного пользователя.

Прикладные математические программы и алгоритмические языки программирования достаточно сложны в освоении, требуют специализированных навыков в процессе работы с ними, поэтому в рамках данного исследования рационально рассматривать другие инструменты.

На основе анализа существующих инструментов компьютерного моделирования для построения программной модели импульсного рефлектометрического уровнемера принято решение использовать среду динамического моделирования SimInTech, которая предназначена для компьютерного представления математических моделей, алгоритмов и интерфейсов управления [6]. Достоинствами программы по сравнению с аналогами, такими как Matlab Simulink, VisSim и LabView, можно считать:

- полностью русскоязычный интерфейс;
- отечественное производство;

– SimInTech уже используется для динамического моделирования объектов ядерной энергетики, а потому компьютерная модель легко может быть встроена в более крупную в качестве субмодели.

Отрезок коаксиальной линии можно построить с использованием стандартных инструментов и встроенных библиотек среды динамического моделирования SimInTech. Элементарный отрезок разбивается на отдельные блоки, имеющие своё функциональное назначение, например в данном случае моделируется задержка распространения сигнала, а также процессы отражения и прохождения через неоднородность, то есть практическая реализация математической модели, полученной в работе [3]. Результат реализации отрезка коаксиальной линии с неоднородностью на конце, реализованной в виде субмодели в среде динамического моделирования SimInTech, показан на рисунке 1.

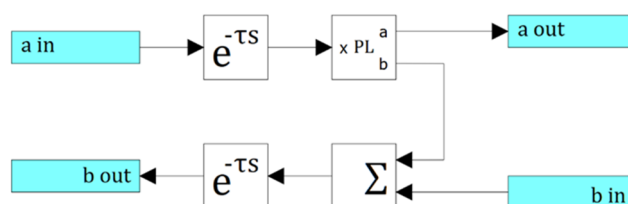


Рисунок 1 – Модель отрезка линии с неоднородностью на конце, построенная в среде динамического моделирования SimInTech

Figure 1 – Model of line segment with heterogeneity at the end built in SimInTech dynamic simulation environment

На рисунке 2 показана реализация субмодели на языке программирования SiminTech в виде четырёхполюсника. Параметры математической модели можно задавать и рассчитывать автоматически, введя скрипт в соответствующее окно рабочего стола SiminTech.

Достоинствами выбранной для реализации разработанной математической модели среды динамического моделирования SiminTech являются:

- 1) интуитивно понятная модель, которая позволяет работать с ней неопытному пользователю, не изучавшему SimInTech ранее, но имеющему подробную инструкцию;
- 2) возможность добавления новых элементов при изменении конфигурации математической модели или её уточнении;
- 3) SimInTech уже используется в системах динамического моделирования АЭС, поэтому разработанную программу возможно внедрить в более крупные комплексы программ.

Реализация компьютерной модели в виде программы в среде динамического моделирования SimInTech показана на рисунке 2.

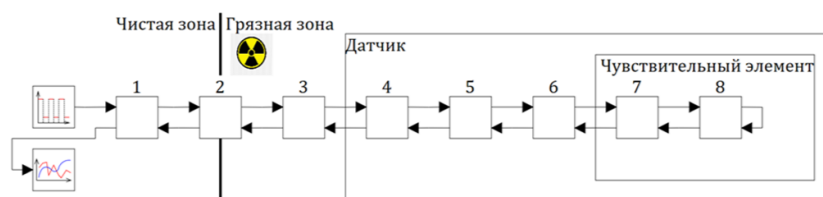


Рисунок 2 – Модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера в среде динамического моделирования SimInTech

Figure 2 – Model of microwave path of pulse reflectometric level meter in SimInTech dynamic simulation environment

Полученная модель может встраиваться в более крупные программные комплексы, а также применяется самостоятельно для исследования свойств и параметров импульсного рефлектометрического уровнемера, также на неё получено авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для имитации работы импульсного рефлектометрического уровнемера ЯЭУ». Компьютерная модель состоит из цепочки субмоделей с введенными параметрами, характеризующими каждый отрезок импульсного рефлектометрического уровнемера (рисунок 3).

Свойства: Маск9			
Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Коэффициент отражения	R	R[S]	-0.2244898
Множитель ослабления в линии	VI	VI[S]	0.99906789
Временная задержка, с	tau	tau[S]	1

Рисунок 3 – Окно параметров субмодели

Figure 3 – Submodel parameters window

При этом параметры модели можно рассчитывать автоматически, введя стартовый скрипт в соответствующее окно рабочего стола среды динамического моделирования SimInTech.

Результаты моделирования

Данная модель позволяет выбрать оптимальную скважность зондирующего сигнала, определить технические параметры и ожидаемый уровень эхо-сигналов от неоднородностей. Для примера на рисунке 4 приведены рефлектограммы при вариации различных параметров зондирующего сигнала.

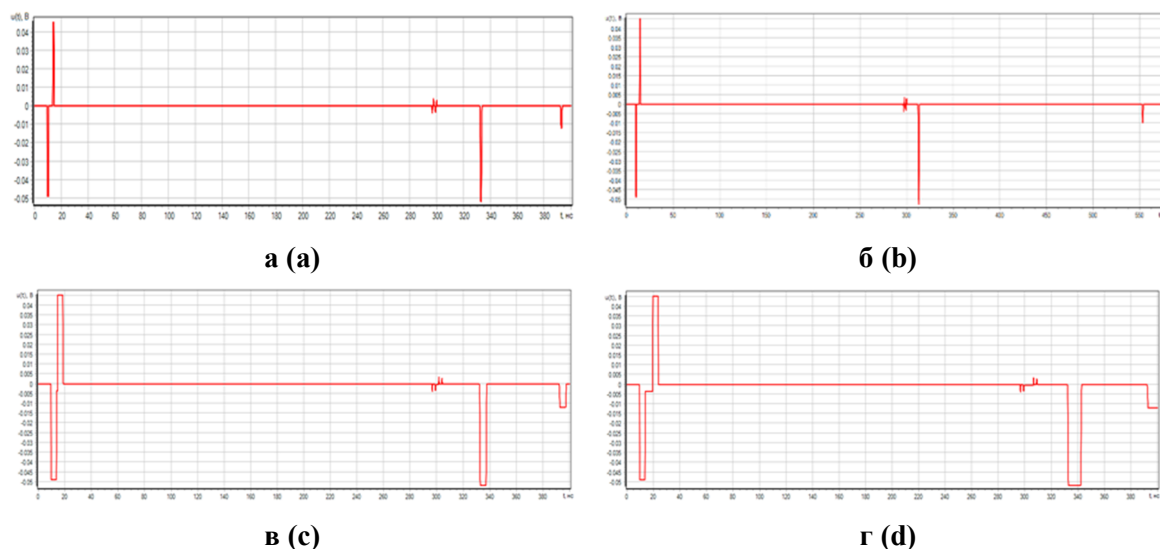


Рисунок 4 – Рефлектограммы импульсного рефлектометрического уровнемера при различных начальных условиях моделирования и уровне теплоносителя 1 метр: а – зондирующий импульс 1 нс; б – уменьшено волновое сопротивление второго изолятора, зондирующий импульс 1 нс; в – зондирующий импульс 5 нс; г – зондирующий импульс 10 нс

Figure 4 – Reflectograms of pulse reflectometric level meter under different initial conditions of modeling at a coolant level of 1 meter: a – probing pulse 1 ns; b – wave resistance of second insulator is reduced, probing pulse 1 ns; c – probing pulse 5 ns; d – probing pulse 10 ns

Из полученных графиков видно, что увеличение длительности зондирующего импульса приводит к искажению положения на временной оси пиков, соответствующих изоляторам и проходной муфте. Данный эффект может являться критическим для работы импульсного рефлектометрического уровнемера в целом, так как измерить расстояние от изолятора до поверхности теплоносителя в показанном случае невозможно.

Заключение

Разработанная математическая модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера дает возможность произвести компьютерное моделирование процесса измерения уровня теплоносителя в первом контуре судовой ЯЭУ, учитывая неоднородности на границах конструктивных элементов тракта. Использование для её реализации среды динамического моделирования SimInTech позволяет при необходимости расширять модель для дополнительных, включая дополнительные неоднородности, а также встраивать полученную модель в более крупные системы.

Компьютерная модель импульсного рефлектометрического уровнемера реализована программно в виде блок-схемы, что позволяет интегрировать её в виде субмодели в программные комплексы, отвечающие за моделирование систем управления и безопасности АЭС и иных объектов, где производится эксплуатация ядерных энергетических установок, а также в интересах разработки импульсных рефлектометрических уровнемеров.

Библиографический список

1. **Дьяконов В.** Рефлектометрия и импульсные рефлектометры [Текст] / В. Дьяконов // Компоненты и технологии. 2011. № 1. С. 164-172.
2. **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.
3. **Корячко В.П., Румянцев С.С., Аронов Л.В.** Математическая модель рефлектометрического уровнемера для измерения уровня воды в контуре ядерной энергетической установки // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 157-165. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-157-165
4. **Курушин А.А.** Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А.Курушин, А.Н. Пластиков. М.: Издательство МЭИ, 2011, 155 с.
5. **Амелина М.А. Амелин С.А.** Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9,10 / Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. 618 с.
6. **Карташов Б.А.** Среда динамического моделирования технических систем SinInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования [Текст] / Б.А. Карташов, Е.А. Шабает, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. М.: ДМК Пресс, 2017. 424 с.

UDC 621.372

MATHEMATICAL MODELING IN DESIGNING REFLECTOMETRIC LEVEL GAUGE FOR MEASURING WATER LEVEL IN NUCLEAR POWER PLANT CIRCUIT

S. S. Rumyancev, Head of the State Defense Defense Department, Morinsis-Agat-KIP JSC, Ryazan, Russia; orcid.org/ 0009-0006-6102-3902, R0806rus@yandex.ru

The article builds a mathematical model of pulse reflectometric level meter designed to measure the coolant level in the first circuit of a nuclear power plant, taking into account the heterogeneity in microwave path. The resulting model is implemented programmatically in SimInTech dynamic modeling environment as a block diagram consisting of submodels. The results of studies of a pulse reflectometric level meter based on a computer model created in SimInTech are obtained.

Keywords: reflectometric level meter, pulse reflectometer, mathematical model, nuclear power plant, computer model, SimInTech.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-143-147

References

1. **D'yakonov V.** Reflektometriya i impul'snye reflektometry [Tekst]. V. D'yakonov. *Komponenty i tekhnologii*. 2011, no. 1, pp. 164-172. (in Russian).
2. **Trenkal' E.I.** Izmerenie urovnej zhidkosti metodom impul'snoj reflektometrii (obzor). E.I. Trenkal', A.G. Loshchilov. *Doklady TUSUR*. 2016, vol. 19, no. 4, pp. 67-73. (in Russian).
3. **Koryachko V.P., Rumyancev S.S., Aronov L.V.** Matematicheskaya model' reflektometricheskogo urovnemera dlya izmereniya urovnya vody v konture yadernoj energeticheskoy ustanovki. *Vestnik Ryzanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023, no. 84, pp. 157-165. (in Russian). DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-157-165.
4. **Kurushin A.A.** *Proektirovanie SVCh ustrojstv v srede CST Microwave Studio*. A.A. Kurushin, A.N. Plastikov. M.: Izdatel'stvo MEI, 2011, pp. 155. (in Russian).
5. **Amelina M.A.** *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap*. Versii 9, 10. M.A. Amelina, S.A. Amelin. Smolensk: Smolenskij filial NIU MEI, 2013, 618 p. (in Russian).
6. **Kartashov B.A.** *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SinInTech: Praktikum po modelirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Tekst] / B.A. Kartashov, E.A. Shabaev, O.S. Kozlov, A.M. Shchekaturov. Moscow: DMK Press, 2017, 424 p. (in Russian).