

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЛИБРОВКИ ИМПУЛЬСНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА С ПОМОЩЬЮ РЕПЕРНЫХ МЕТОК

Корячко В.П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР РГРТУ, koryachko.v.p@rsreu.ru
Румянцев С.С., начальник отдела обеспечения ГОЗ АО «Моринсис-Азам-КИП», R0806rus@yandex.ru
Аронов Л.В., доцент кафедры РЭС РГРТУ, e-mail: aronov.l.v@rsreu.ru

THE MODEL WITH CALIBRATION A PULSE REFLECTOMETRIC LEVEL GAUGE USING REFERENCE MARKS

Koryachko V.P., Romyancev S.S., Aronov L.V.

In order to control the coolant level in the primary circuit of a nuclear power plant, it is proposed to use pulsed reflectometric level gauges. In this article, a method for calibrating a sensitive element based on reference marks is substantiated, which makes it possible to level the influence of temperature from 277 K to 523 K and pressure from 0.1 to 25 MPa. Various designs of labels are considered, their advantages and disadvantages are described. A computer simulation of a pulsed reflectometric level gauge was performed using the SimInTech dynamic simulation environment. The simulation results, including the appearance of the reflectogram, correspond to theoretical assumptions. The resulting model allows optimization to select the parameters of the fiducial marks, and can be extended to study additional inhomogeneities in the sensitive element of a pulsed reflectometric level gauge.

Key words: reflectometric level gauge, pulsed reflectometer, mathematical model, nuclear power plant, computer model, SimInTech.

Ключевые слова: рефлектотрический уровень, импульсный рефлектотрический, математическая модель, ядерная энергетическая установка, компьютерная модель, SimInTech.

Введение

Существуют различные способы измерить уровень жидкости в ёмкостях промышленного оборудования, технологических установок, хранилищ и т.д. Выбор и применение конкретного метода зависит от особенностей решаемой задачи, например, высокая температура, агрессивность среды, радиоактивность, вязкость, токсичность, высокое давление и прочие факторы. Первый контур ядерной энергетической установки омывает непосредственно активную зону реактора, поэтому для теплоносителя (дистиллированной воды) характерны высокая температура от 277 К до 523 К, большой разброс давления от 0,1 до 25 МПа, экстремальный уровень радиации, причем не только в самом контуре, но и снаружи вблизи его конструктивных элементов. Применение обычных поплавковых датчиков в такой ситуации невозможно, так как они требуют периодического обслуживания и могут разрушаться. Для агрессивных сред обычно применяются бесконтактные датчики, ультразвуковые, радиолокационные и рефлектотрические. Ультразвуковые уровнемеры имеют ряд ограничений, в частности не работают в условиях высоких температур и давлений [1]. Радиолокационные датчики эффективны для агрессивных сред [2-4], однако подразумевают нахождение электронной части непосредственно на ёмкости, к которой он крепиться, что в свою очередь требует герметичного крепления в условиях высокого давления и защиту электроники от высокой температуры. Кроме того,

В интересах контроля уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки предложено использовать импульсные рефлектотрические уровнемеры. В настоящей статье обоснован метод калибровки чувствительного элемента на основе реперных меток, позволяющий нивелировать влияние температуры от 277 К до 523 К и давления от 0,1 до 25 МПа. Рассмотрены различные конструкции меток, описаны их достоинства и недостатки. Выполнено компьютерное моделирование импульсного рефлектотрического уровнемера, с использованием среды динамического моделирования SimInTech. Результаты моделирования, в том числе внешний вид рефлектотриграммы, соответствуют теоретическим предположениям. Полученная модель позволяет провести оптимизацию, для выбора параметров реперных меток, и может быть расширена для исследования дополнительных неоднородностей в чувствительном элементе импульсного рефлектотрического уровнемера.

высокий уровень радиации приведёт к отказу и разрушению электрической части. Возможным вариантом является использование конструкции, описанной в работе [2], но при этом возникает техническая проблема ввода в чувствительный элемент зондирующих импульсов сверхвысокой частоты и герметизации.

Импульсные рефлектотрические уровнемеры, предназначенные для измерения уровня воды в первом контуре ядерной энергетической установки, обладают рядом достоинств по сравнению с другими методами. Данные устройства надежны, способны работать в условиях высоких температур и давления, устойчивы к воздействию жесткого ионизирующего излучения. Измерение уровня воды происходит бесконтактно, что позволяет вынести электронную часть импульсного рефлектотрического уровнемера в отдельное помещение, тем самым избавив его от влияния радиации, одновременно

с этим упрощается техническое обслуживание.

Главный недостаток рассматриваемого способа измерения – влияние температуры и давления на точность измерения уровня жидкости, вследствие изменения относительной диэлектрической проницаемости, от которой зависит скорость распространения зондирующих импульсов [6]. Выходом из данной проблемы может быть установка датчиков температуры и давления внутри ёмкости с теплоносителем, либо калибровка с использованием реперных меток, расположенных в чувствительном элементе импульсного рефлектометрического уровнемера.

Целью работы является исследование различных вариантов конструктивной реализации реперных меток и определение их параметров.

Математическое обоснование калибровки чувствительного элемента по реперным меткам

Чувствительный элемент импульсного рефлектометрического уровнемера для измерения уровня воды в первом контуре ядерной энергетической установки представляет собой жёсткую коаксиальную линию длиной 6 м, в которой роль внешней металлизации играет трубка из нержавеющей стали или титана с внутренним диаметром 21 мм, а внутренний проводник представляет собой полнотелый металлический стержень диаметром 6 мм. На конце чувствительного элемента располагается короткозамыкающая шайба, а волновое сопротивление при воздушном заполнении 75 Ом. В процессе эксплуатации чувствительный элемент можно разделить на затопленную часть длиной l_3 и незатопленную l_{H3} участка чувствительного элемента датчика импульсного рефлектометрического уровнемера, с учётом того, что скорость распространения сигнала v_n равна [7]:

$$v_n = c / \sqrt{\varepsilon}. \quad (1)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, а ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

Определяется по формулам [7]:

$$\begin{aligned} l_3 &= \tau_3 \cdot c / \sqrt{\varepsilon_3}; \\ l_{H3} &= \tau_{H3} \cdot c / \sqrt{\varepsilon_{H3}}, \end{aligned} \quad (2)$$

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 – относительная диэлектрическая проницаемость затопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера; ε_{H3} – относительная диэлектрическая проницаемость незатопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера.

Скорость распространения зондирующего сигнала уменьшается, пропорционально, зависящему от относительной диэлектрической проницаемости, коэффициенту замедления равному $1/\sqrt{\varepsilon}$ [7]. В результате настоя-

щие длины затопленного l_3^* и незатопленного l_{H3}^* участков чувствительного элемента могут отличаться от измеренных, так как расчётные диэлектрические проницаемости затопленного ε_3^* и незатопленного ε_{H3}^* участков тоже отличны от реальных. В таком случае, погрешность измерения длин затопленного Δl_3^* и незатопленного Δl_{H3}^* участков составит:

$$\begin{aligned} \Delta l_3 &= |l_3 - l_3^*|; \\ \Delta l_{H3} &= |l_{H3} - l_{H3}^*|. \end{aligned} \quad (3)$$

Допустим у нас есть две реперные метки, причём первая отстоит от изолятора в начале чувствительного элемента на длину l_1 , а вторая от короткого замыкания на длину l_2 . Расположение меток выбирается так, чтобы первая метка с большой вероятностью находилась в незатопленной части, а вторая в затопленной. При этом измеряться может как длина затопленной части, так и длина незатопленной. Для проведения калибровки выполняется измерение скорости распространения зондирующего сигнала на этих участках с известной заранее длиной.

Реперные метки позволяют выполнить измерение скорости распространения сигнала в затопленном v_3 и незатопленном v_{H3} участке чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, на основе известных длин отрезков l_1 и l_2 , ограниченных реперными метками:

$$\begin{aligned} v_3^* &= c / \sqrt{\varepsilon_3^*} = l_2 / \tau_2; \\ v_{H3}^* &= c / \sqrt{\varepsilon_{H3}^*} = l_1 / \tau_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_1 – время прохождения первого реперного отрезка, с; а τ_2 – время прохождения второго реперного отрезка, с.

После проведения калибровки, длины затопленного l_3 и незатопленного l_{H3} участка чувствительного элемента определяются по формулам:

$$\begin{aligned} l_3 &= \tau_3 v_3^* = \tau_3 \cdot l_2 / \tau_2; \\ l_{H3} &= \tau_{H3} v_{H3}^* = \tau_{H3} \cdot l_1 / \tau_1. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате применения данного метода компенсации влияния колебаний температуры и давления на относительную диэлектрическую проницаемость теплоносителя и сухого пара в ёмкости первого контура ядерной энергетической установки отпадает необходимость установки дополнительных датчиков температуры и давления. Затопление или осушения обоих меток возможно обнаружить по рефлектограмме и внести соответствующие поправки в алгоритм калибровки, однако в любом случае хотя бы одна метка будет затоплена или осушена полностью, что позволит осуществлять калибровку независимо от уровня теплоносителя.

Конструктивное исполнение реперных меток в чувствительном элементе

Рассмотрим возможные варианты конструктивного исполнения реперных меток для калибровки чувствительного элемента рефлектометрического уровнемера.

Волновое сопротивление коаксиального фидера рассчитывается по формуле [7]:

$$Z_B = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{D}{d}, \quad (6)$$

где D – внутренний диаметр внешнего проводника коаксиальной линии, м; d – диаметр внутреннего проводника коаксиальной линии, м.

Создание неоднородности – реперной метки, путём изменения волнового сопротивления, можно осуществить либо сужением внешней части чувствительного элемента (рис. 1), либо расширением внутреннего проводника (рис. 2).

Возникшая в результате неоднородность на i -м отрезке чувствительного элемента имеет коэффициент отражения R_i , которой определяется по формуле [7]

$$R_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i}, \quad (7)$$

Из выражения два следует, что задав желаемый коэффициент отражения R_i можно переделить сопротивление реперной метки по формуле:

$$Z_{i+1} = Z_i \frac{(R_i + 1)}{(1 - R_i)}. \quad (8)$$

От коэффициента отражения зависит амплитуда отраженной волны, которая впоследствии отобразится на рефлектограмме в виде эхо-сигнала, однако нужно учесть, что коэффициент прохождения сигнала T_i через неоднородность равен

$$T_i = 1 - |R_i|. \quad (9)$$

Из этого следует, что коэффициент отражения следует подбирать с учётом последующих за реперной меткой неоднородностей, а задача по его определению – является задачей многокритериальной оптимизации, в которой, в первом приближении, следует учесть амплитуды волны, отраженной от каждого участка. Более подробный анализ может также учитывать коэффициенты отражения отраженных волн со стороны конца чувствительного элемента. В случае больших значений коэффициентов отражения сделать это целесообразно, так как эхо-сигналы могут теряться в процессе обратного прохождения или возникать ложные отражения.

На основе изложенного вытекает недостаток предложенной конструкции, реперная метка (рис. 1, 2) состоит из 2-х неоднородностей в начале и конце метки. Вследствие этого происходит двойное отражение, а фактический коэффициент прохождения равняется $(1 - |R_i|)^2$.

На практике это означает с одной стороны уменьшение амплитуды сигнала, прошедшего через реперную метку, и как следствие, амплитуд всех последующих эхо-сигналов. С другой стороны, два близко расположенных отражения могут создать неопределенность при измерении скорости в процессе калибровки, внося дополнительную погрешность измерения на величину длины метки. Устранить этот недостаток можно введя протяжённую реперную метку, образованную сужением внешней части (рис. 3) либо расширением внутреннего проводника (рис. 4) чувствительного элемента, где фактической меткой-неоднородностью является граница начала и окончания сужения или расширения внутренней полости чувствительного элемента.

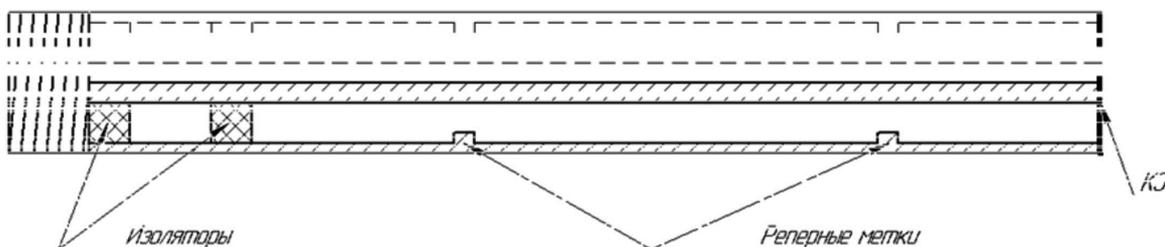


Рис. 1. Реперная метка, образованная сужением внутреннего диаметра корпуса чувствительного элемента

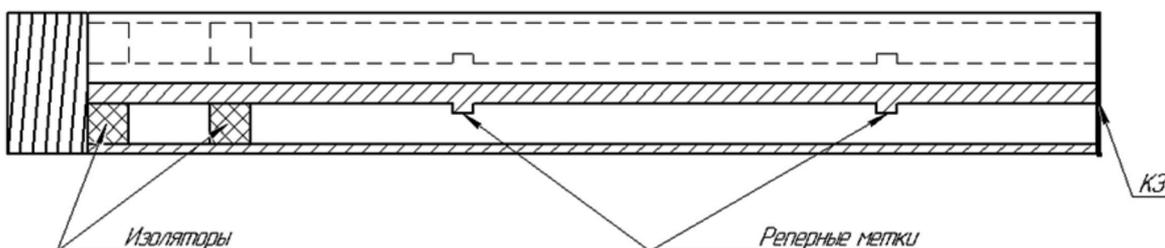


Рис. 2. Реперная метка, образованная расширением внутреннего проводника

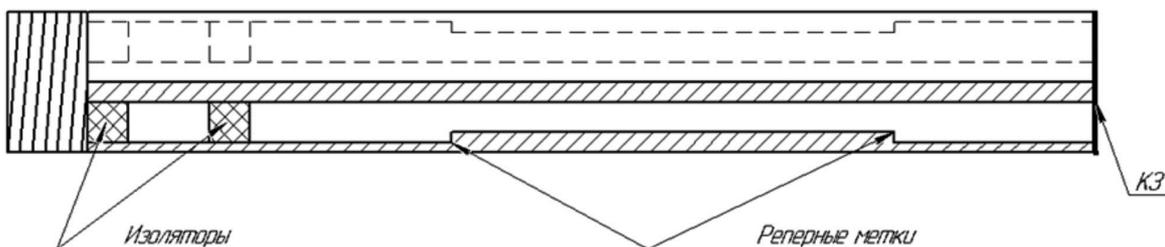


Рис. 3. Реперная метка в виде сплошного сужения внутреннего диаметра корпуса чувствительного элемента

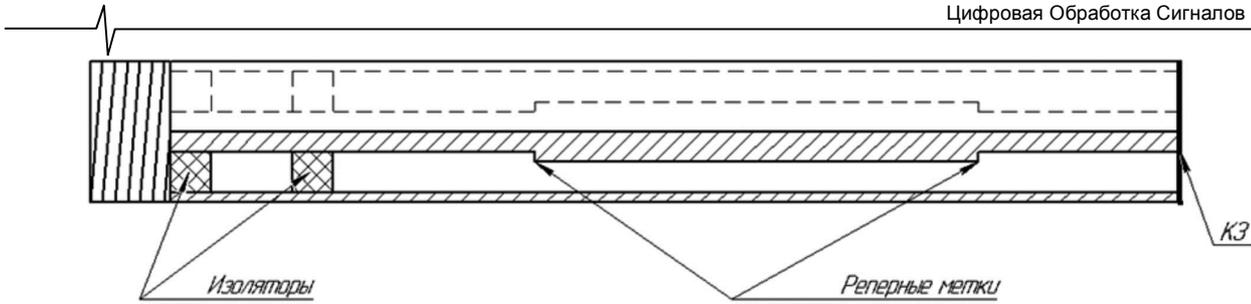


Рис. 4. Реперная метка в виде сплошного расширения внешнего проводника

В этом случае имеет место рефлектограмма не будет иметь сдвоенного эхо-сигнала на границе реперной метки, а энергетические характеристики системы в целом улучшатся, за счёт увеличения коэффициента прохождения через неоднородность.

Математическая модель чувствительного элемента с реперными метками

Однородный отрезок чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, имеющий неизменные электрические параметры вдоль своей длины и граничащий с другими отрезками можно представить в виде линии, которая характеризуется временной задержкой и потерями, с неоднородностью на конце.

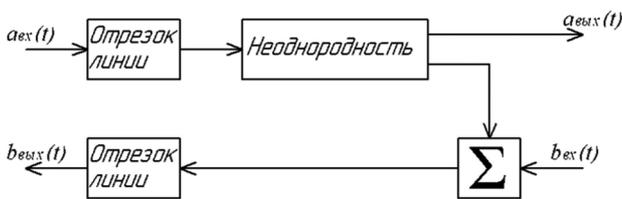


Рис. 5. Модель отрезка линии с неоднородностью на конце

Каждый *i*-й отрезок чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера характеризуется входной $a_{вхi}$ и выходной $a_{выхi}$ падающими и входной $b_{вхi}$ и выходной $b_{выхi}$ отраженными волнами, которые вычисляются согласно выражению:

$$\begin{cases} a_{выхi}(t) = V_i T_i a_{вхi}(t - \tau_i); \\ b_{выхi}(t) = V_i^2 R_i a_{вхi}(t - 2\tau_i) + V_i T_i b_{вхi}(t - \tau_i), \end{cases} \quad (10)$$

где V_i – коэффициент передачи *i*-го участка импульсного рефлектометра; T_i – коэффициент прохождения на границе раздела *i*-го и *i* + 1-го участка импульсного рефлектометра; R_i – коэффициент отражения на границе раздела *i*-го и *i* + 1-го участка импульсного рефлектометра; τ_i – задержка распространения сигнала в *i*-м участке импульсного рефлектометра, с.

Коэффициент передачи *i*-го отрезка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера V_i определяется по формуле:

$$V_{ли} = 10^{-\frac{\alpha_i l_i}{20}}, \quad (11)$$

где α_i – коэффициент затухания, дБ/м; l_i – длина *i*-го участка импульсного рефлектометра, м;

Задержка распространения сигнала τ_i равна

$$\tau_i = l_i / v_i, \quad (12)$$

где v_i – скорость распространения сигнала на *i*-м

участке импульсного рефлектометра, м/с.

Непосредственно чувствительный элемент и СВЧ-тракт импульсного рефлектометрического уровнемера моделируется путём комбинации отрезков, показанных на рис. 5, с соответствующим выбором параметров.

Результаты компьютерного моделирования чувствительного элемента

Построение компьютерной модели элементов СВЧ-тракта связано с использованием средств автоматического проектирования или специализированных программных продуктов, схмотехнических, таких как Microwave Office [8, 9], программ полного электродинамического моделирования, например, CST Microwave Studio [10], или сред динамического моделирования технических систем, таким как SimInTech [11]. В данном случае моделирование произведено в среде SimInTech – специализированного программного обеспечения, предназначенного для разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления. Отрезок линии с неоднородностью на конце описывается визуально, с помощью блок-схемы и модель, показанная на рис. 5, построенная в среде SimInTech приведена на рис. 6.

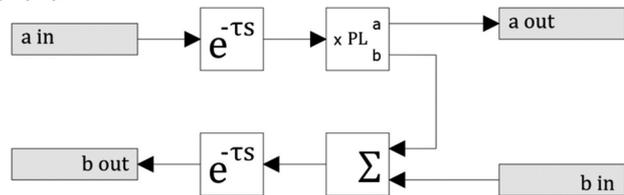


Рис. 6. Модель отрезка линии с неоднородностью на конце построенная в среде SimInTech

В данной модели падающая волна с входа попадает на блок идеального транспортного запаздывания, а затем поступает на блок разделяющий волну на прошедшую и отражённую. В результате часть волны проходит на выход, а часть суммируется с отраженной волной с последующего отрезка и поступающая на блок идеального транспортного запаздывания в обратном направлении. Модель чувствительного элемента в составе СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера, выполненная в среде динамического моделирования SimInTech, оказана на рис. 7.

Здесь 7 – участок между изолятором и первой реперной меткой, 8 – оставшаяся незатопленная часть чувствительного элемента, 9 – затопленная часть чувствительного элемента до второй реперной метки, 10 – участок между второй реперной меткой и концом чувствительного элемента.

Примем отклонения сопротивление на неоднородно-

стях СВЧ-тракта равным 5 %, тогда рефлектограмма, без реперных меток, построенная для уровня теплоносителя 2 метра (чувствительный элемент затоплен на 2 метра), примет вид, показанный на рис. 8.

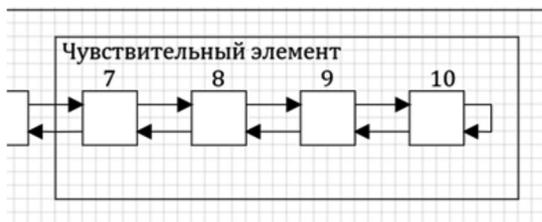


Рис. 7. Модель чувствительного элемента (фрагмент модели СВЧ-тракта) импульсного рефлектометрического уровнемера

Отметим что первые два пика соответствующие переходной муфте и пики с 3-й по 6-й. соответствующие изоляторам образованы неоднородностями с коэффициентом отражения, модуль которого равен 0,025. Коэффициент отражения эхо-сигнала равен -0,8, а коэффициент отражения от конца чувствительного элемента – -1. Посмотри на рефлектограмму с двумя реперными метками, расположенными на расстоянии 1 метр от начала и от конца чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера (рис. 9).

Параметры СВЧ-тракта в этом случае те же, при этом коэффициент отражения от первой реперной метки (M1) равен 0,1, а от второй (M2) – 0,5. Видно, что большой коэффициент отражения не означает большую амплитуду, так как имеют место потери в линии, а кроме того часть энергии отражается, что автоматически уменьшает амплитуды последующих отражений от не-

однородностей. Данное явление согласуется с теоретическими выкладками и отсюда следует необходимость многокритериального подхода для выбора оптимальной величины коэффициента отражения для реперных меток.

Заключение

В настоящей статье была получена расширенная модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера для измерения уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки, позволяющая учитывать дополнительные неоднородности. Метод калибровки на основе реперных меток даёт возможность корректировать погрешность измерения уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки, возникающей за счёт изменения относительной диэлектрической проницаемости, в результате колебаний температуры от 277 до 523 К и давления от 0,1 до 25 МПа. Компьютерная модель среде динамического моделирования SimInTech и позволяет решать задачи, связанные с оптимизацией параметров. К недостаткам стоит отнести то, что не учитываются импульсная характеристика отрезков СВЧ-тракта и переотражения на неоднородностях, однако для анализа и принятия решений в первом приближении существующих возможностей модели достаточно, а гибкость и адаптивность среды SimInTech позволяет расширить и адаптировать модель под дополнительные задачи, с учётом новых параметров.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

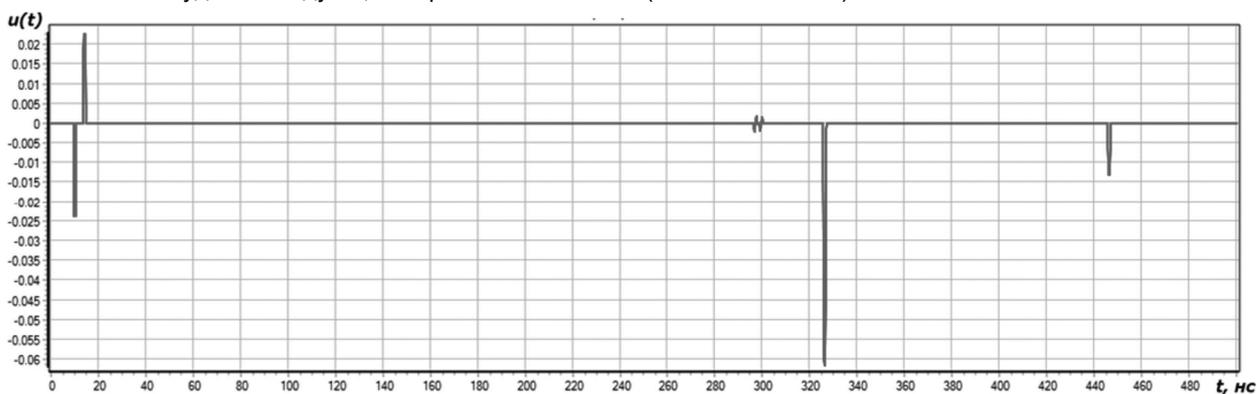


Рис. 8. Рефлектограмма для случая чувствительного элемента без реперных меток

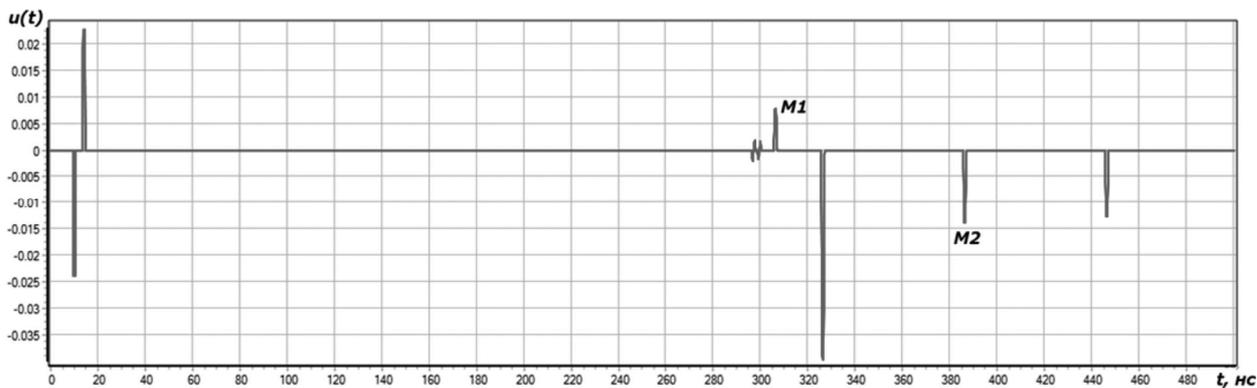


Рис. 9. Рефлектограмм для случая чувствительного элемента с реперными метками

Литература

1. Крым А.Е. Применение ультразвуковых уровнемеров в различных областях промышленности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vzljot.ru/files/publications/014.pdf>. Дата обращения 21.04.2023
2. Атаянц Б.А. Измерение уровня заполнения волноводной направляющей системы частотным дальномером при минимальном числе отсчетов сигнала / Б.А. Атаянц, В.М. Давыдочкин, В.В. Езерский. Радиотехника. 2016. № 11. С. 97-102.
3. Баранов И.В. Влияние шума на точность определения расстояния дальномером с адаптивной частотной модуляцией / И.В. Баранов, В.В. Езерский. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 21. С. 31-36.
4. Баранов И.В. Влияние помех на погрешность измерения расстояния в частотном дальномере промышленного применения / И.В. Баранов, В.В. Езерский. Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2011. Вып. 3 (37). С. 34-40.
5. Тренкаль Е.И. Измерение уровней жидкости методом импульсной рефлектометрии (обзор) / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лоцилов. Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19, № 4. С. 67-73.
6. Мулёв Ю.В. Экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости сухого насыщенного водяного пара / Ю.В. Мулев, С.Н. Смирнов, М.Ю. Мулев. Теплоэнергетика: Ежемесячный теоретический и научно-практический журнал / Российская академия наук. Российское научно-техническое общество энергетиков и электротехников. Москва. 2011. № 4. С. 57-60
7. Боков Л.А. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие / Л.А. Боков, В.А. Замотринский, А.Е. Мандель. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. 410 с.
8. Васильев Е.П. Моделирование микроволновых делителей-сумматоров submodule усилителей мощности / Е.П. Васильев. Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2020. Вып. 1 (71). С. 23-33.
9. Васильев Е.П. Анализ методов моделирования микроволновых устройств на примере полосового фильтра с расширенной полосой заграждения / Е.П. Васильев. Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2020. Вып. 2 (72). С. 62-70.
10. Богословский А.В. Рассеяние электромагнитных волн диэлектрическими и металлизированными объектами с осевой симметрией / А.В. Богословский. Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2022. Вып. 4 (82). С. 19-26.
11. Карташов Б.А. Среда динамического моделирования технических систем SinInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. М.: ДМК Пресс, 2017. 424 с.

НОВЫЕ КНИГИ

Поборчая Н.Е.

Методы и алгоритмы оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности в системах с приемником прямого преобразования: Учебное издание для вузов, М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2023 г. 240 с.: ил.

Изложены методы и алгоритмы совместного оценивания параметров сигнала (канала связи) в условиях априорной неопределенности относительно статистических характеристик канала связи и законов распределения шумов. Особое внимание уделено системам с приемником прямого преобразования. Рассмотрены вопросы синтеза и анализа процедур оценивания для систем связи с одной передающей и приемной антенной (SISO), с несколькими передающими и приемными антеннами (MIMO), а также для систем с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM).

Предложенные алгоритмы способствуют повышению помехоустойчивости приема информации или понижению вычислительной сложности процедур обработки сигнала.

Для научных работников, инженеров и аспирантов. Может быть полезна студентам старших курсов и магистрантам, обучающимся по направлению подготовки «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Косичкина Т.П., Сперанский В.С.

Цифровые сигнальные процессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2022 г. 316 с.: ил.

Рассмотрены вопросы теории и практики использования цифровых сигнальных процессоров. Описаны основные операции цифровой обработки сигналов, структура, архитектура, классификация и характеристики современных процессоров. Представлен обзор процессоров ведущих фирм-производителей: Analog Devices, Ceva, Feccsale, Texas Instruments. Отдельная глава посвящена российским цифровым процессорам. Существенное внимание уделено многоядерным процессорам и их характеристикам. В разделе, связанном с программируемыми логическими микросхемами и системами на кристалле показаны возможности их использования в качестве сигнальных процессоров. Даны примеры реализации цифровых устройств с помощью САПР на языке программирования VHDL, рассмотрены его элементы. В приложениях даны примеры реализации формирователей двоичных последовательностей, генераторов сигналов и медианных фильтров.

Для студентов радиотехнических и инфокоммуникационных специальностей, будет полезна аспирантам и специалистам.

