

Алгоритм селекции полезных сигналов в задаче TDR-измерения уровней многофазных жидкостей

Выявлена закономерность возникновения паразитных переотражений. Показано, что имеет неоднозначность определения параметров многофазных жидкостей в связи с наличием паразитных переотражений. Разработан алгоритм селекции первичных сигналов на фоне вторичных сигналов.

Ключевые слова: короткоимпульсная рефлектометрия, TDR, уровень, переотражения, алгоритм, селекция.

Введение. Короткоимпульсная рефлектометрия является распространенным методом, активно используемым для решения широкого спектра задач измерения и диагностики [1-2]. Одной из перспективных сфер применения данного метода является измерение уровня жидкости в резервуарах [3-7]. Наряду с преимуществами (высокая точность измерения, нечувствительность к изменениям параметров окружающей среды), методу свойственны некоторые недостатки, которые могут привести к возникновению ошибки измерения. Как показано в [8], источниками погрешности TDR-метода могут являться: несогласованный или неидеальный переход между измерительным зондом и блоком генерации и обработки; некорректный учет затухания сигнала (включающий в себя затухания во внешней среде и в линии передачи), распространяющегося по измерительному зонду.

При анализе многофазных жидкостей дополнительным источником погрешности могут служить паразитные отклики [8-10], которые являются результатом многократных переотражений сигналов на границах раздела фаз (слоев) жидкости. В [11] было отмечено, что наличие таких откликов на рефлектограмме может привести к неверной её интерпретации. В [12] было экспериментально показано наличие таких паразитных откликов и дана оценка их величины для случая модельной среды “воздух-нефть-вода”.

На наш взгляд, данному источнику погрешности при TDR-анализе многофазных сред уделяется недостаточное внимание. При том, что последствием ошибки может быть, как неправильное определение уровней сред, так и ошибочное понимание компонентного состава жидкостей в резервуаре.

В работе показана природа возникновения паразитных откликов, предложен алгоритм селекции полезных, сигналов при TDR-анализе многофазных жидкостей.

Анализ проблемы.

Рефлектометрический способ измерения уровня жидкости состоит в следующем. В исследуемую жидкость погружается измерительный зонд (к примеру, в виде коаксиальной линии). На вход измерительного зонда подается тестовый сигнал (короткий импульс или перепад напряжения). Сигнал, распространяясь по измерительному зонду, претерпевает отражения на границах раздела фаз. Возникающие при таких отражениях отклики регистрируются на входе измерительного зонда, а по их форме и задержке относительно тестового сигнала определяются параметры исследуемой жидкости.

На рис. 1 приведена упрощенная модель распространения сигнала в многофазной

жидкости, характеризующейся набором относительных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и шириной слоев l_1, l_2, l_3 .

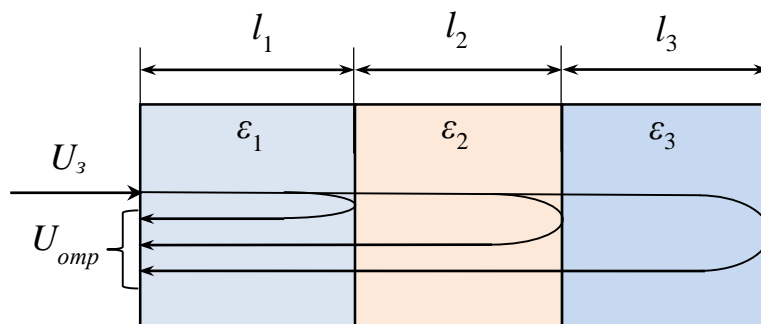


Рис. 1. Распространение электромагнитных волн в многофазных средах без учета вторичных отражений.

Задержки отраженных сигналов, при таком приближении, могут быть рассчитаны по формуле:

$$\Delta t_i = 2 \cdot \sum_i \frac{l_i \sqrt{\varepsilon_i}}{c} = 2 \cdot \sum_i \tau_i \quad (1)$$

где Δt_i – задержка сигнала относительно зондирующего импульса;
 l_i – длина i -го слоя;
 ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость i -го слоя;
 c – скорость света;
 τ_i – время распространения в i -м слое;
 i – индекс слоя.

На практике имеет место более сложный случай, когда на измерительный вход наряду с первичными откликами, задержка возникновения которых определена выражением (1), поступают сигналы, являющиеся результатом многократных переотражений тестового сигнала и его откликов от границ разделов фаз. Будем называть такие сигналы откликами высших порядков (2-го, 3-го и т.д.).

На рис. 2 приведена модель распространения сигналов в многофазной среде, иллюстрирующая механизм возникновения откликов второго порядка. Сплошной кривой показаны отклики первого порядка, прерывистой – отклики второго порядка.

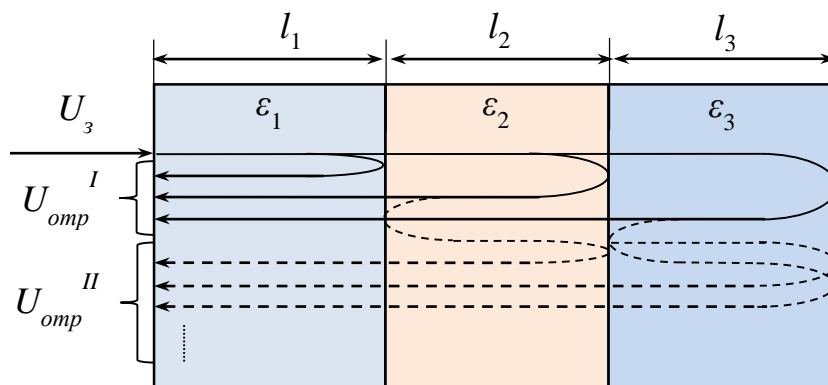


Рис. 2. Распространение электромагнитных волн в многофазных средах с учетом вторичных отражений

Необходимо заметить, что в отсутствии потерь в измерительном зонде в отраженном сигнале могут обнаруживаться отклики высоких порядков. Однако на практике всегда

имеет место затухание сигнала, которое и определяют порядок отклика, обнаруживаемого на входе измерительного зонда.

На основании [9] было выполнено моделирование отклика измерительного зонда, погруженного в многофазную среду со следующими параметрами:

1-й слой:

ширина $l_1 = 325$ мм;

относительная диэлектрическая постоянная $\epsilon_1 = 1$;

потери $d_1 = 0.5$ дБ/м.

2-й слой:

ширина $l_2 = 75$ мм;

относительная диэлектрическая постоянная $\epsilon_2 = 2.1$;

потери $d_2 = 3$ дБ/м.

3-й слой:

ширина $l_3 = 100$ мм;

относительная диэлектрическая постоянная $\epsilon_3 = 80$;

потери $d_3 = 6$ дБ/м.

На рис. 3 приведена расчетная характеристика сигнала на входе измерительного зонда в режиме воздействия коротким импульсом Гаусса длительностью по уровню 50% равной 30 пс и амплитудой (на согласованную нагрузку) равной 1 В.

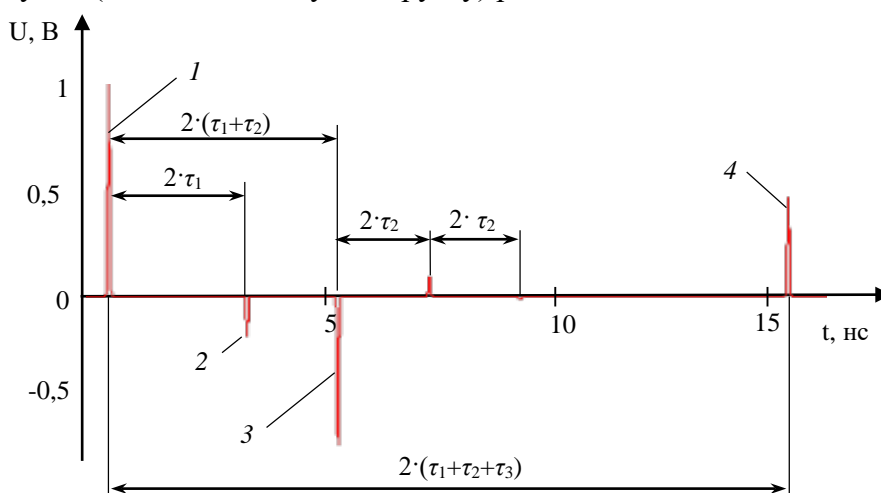


Рис. 3. Рефлектограмма модельной многофазной жидкости: 1 – зондирующий импульс; 2 – отражение от границы воздух-нефть; 3 – отражение от границы нефть-вода; 4 – отражение от конца линии.

Расчетная рефлектограмма содержит как отклики первого порядка (рис. 3, поз. 2–4), так и отклики второго (рис. 3, поз. 2–4) порядка. Время прихода некоторых откликов второго (рис. 3, поз. 2–4) порядка опережает время откликов первого порядка, а их амплитуды сопоставимы (рис. 3, поз. 2 и поз. 4). Показанная последовательность прихода сигналов может привести к неоднозначности трактовки полученных результатов при решении задачи экстракции параметров слоев многофазной жидкости с использованием рефлектометрического подхода.

Для устранения неоднозначности необходимо разработать алгоритм обработки рефлектограммы, позволяющий выполнить селекцию откликов первого порядка на фоне откликов высших порядков.

Алгоритм селекции сигналов. Для устранения описанной неоднозначности предложен алгоритм селекции отраженных сигналов первого порядка. В основу функционирования алгоритма положен критерий периодичности возникновения откликов высших порядков.

Предложенный алгоритм 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 вектор T .

2) Формирование вектора уникальных задержек BD

Выполняется расчет взаимных задержек между отраженными импульсами:

$$\Delta = T_i - T_j$$

где $i = 2..N-1$;

$j = 1..i-1$;

N – количество элементов вектора T .

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

3) Селекция откликов первого порядка, формирование вектора TP

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

Блок-схема алгоритма селекции сигналов изображена на рис. 4.

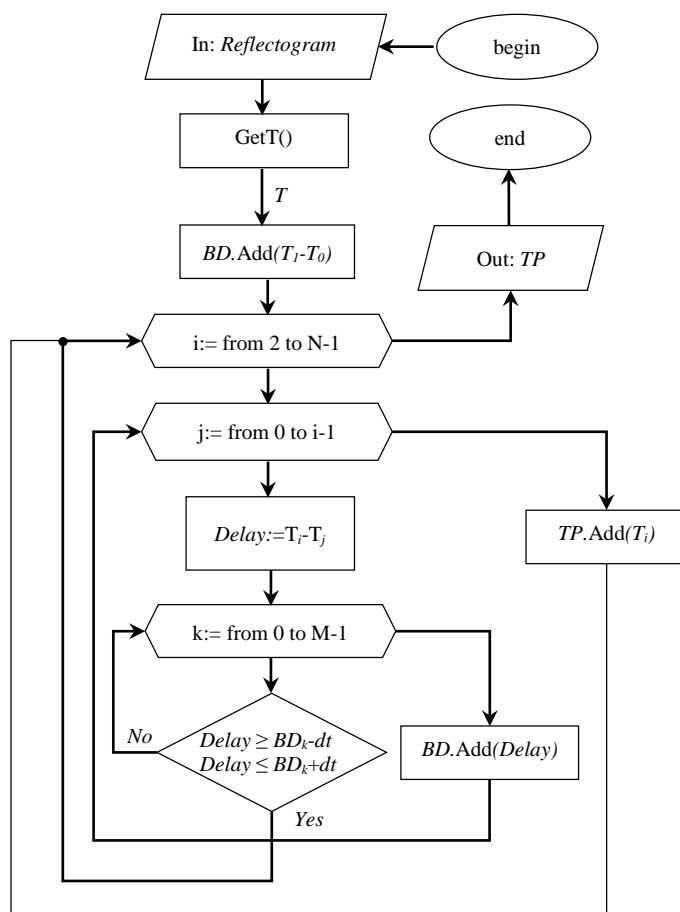


Рис. 4. Блок-схема алгоритма селекции сигналов.

На рис. 5 приведены результаты селекции откликов с использованием разработанного алгоритма.



Рис. 5. Результаты работы алгоритма селекции

Заключение. Паразитные отклики являются результатом многократных переотражений сигналов на границах раздела фаз различных сред. Неучет этих паразитных откликов может привести как к неправильному определению уровней сред, так и к ошибочному пониманию компонентного состава жидкостей в резервуаре.

В данной работе была показана природа возникновения паразитных переотражений и было установлено, что переотражения имеют периодический характер. Показано, что в связи с этим может возникнуть неоднозначность трактовки полученной рефлектограммы.

Для устранения возможности ошибки был разработан алгоритм селекции сигналов первого порядка на фоне сигналов высших порядков. Алгоритм показал свою эффективность на математической модели, и, следовательно, может быть применен на рефлектограммах, полученных экспериментально.

Библиографический список

1. Глебович Г.В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
2. Jones S.B. Time domain reflectometry measurement principles and application / S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or // Hydrol Process. – 2002. – № 16. – С. 141–153.
3. Nemarich C.P. Time domain reflectometry liquid level sensors // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 2001. – № 4. – С. 40–44.
4. Cataldo A. A TDR Method for Real-Time Monitoring of Liquids / Cataldo A., Tarricone L., Attivissimo F., Trotta A. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2007. – №. 56. – С. 582–595.
5. Gerding M. Precision level measurement based on time-domain reflection (TDR) measurements / Gerding M., Musch T., Schiek B. // Advances in Radio Science. – 2002. – С. 27–31.
6. Cataldo A. Uncertainly Estimation in Simultaneous Measurements of Levels and Permittivities of Liquids Using TDR Technique / Cataldo A., Tarricone L., Vallone M., Attivissimo F., Trotta A. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – Vol. 57. – С. 454–466.
7. Yahya S.I. A Multi-level Gauging System for Crude Oil Settling Mass Tanks Using A One-port Time-domain Technique // WIT Transactions on Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 81. – С. 255–266.
8. Courtney C.C. Time-domain measurement of the electromagnetic properties of materials // Microwave theory and techniques. – 1998. – № 5. – С. 517–522.
9. Лощилов А.Г. Модель измерительной системы для рефлектометрического анализа параметров многофазной жидкости / А.Г. Лощилов, Е.И. Тренкаль // 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы конференции. – Севастополь, 2015. – С. 888–889.
10. Тренкаль Е.И. Экспериментальная установка для рефлектометрических исследований параметров многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2015. – 2015. – № 1. – С. 59–62.