

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ TDR

© 2016 г. Е.И. ТРЕНКАЛЬ, А.Г. ЛОЩИЛОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
СКБ «Смена», г. Томск
e-mail: main@skbsmena.ru

Введение

В настоящее время существует множество практических задач, требующих точного измерения уровня жидких или сыпучих материалов. Среди них: измерение уровней фракций нефти в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, определение пропорций продуктов для дальнейшего смешивания в химической или пищевой промышленности, определение уровней топлива в транспортных средствах.

В зависимости от требований к точности измерения, свойств измеряемой среды и внешних факторов применяются различные методы измерения уровней [1]. Среди всего множества стоит выделить рефлектометрический (TDR) способ измерения. Высокая точность, надежность, универсальность и относительно низкая стоимость метода способствует его активному развитию и применению в самых разных областях промышленности.

Целью настоящей работы является систематизация публикаций и анализ тенденций развития метода рефлектометрии во временной области (TDR) для задачи измерения уровней однофазных и многофазных жидкостей.

Применение TDR метода для измерения уровней однофазных жидкостей

Первые работы по применению TDR метода для анализа уровней жидкостей относятся к 60-м годам прошлого века [2, 3]. В качестве измерительного зонда простейшего TDR уровнемера использовалась линия передачи с воздушным заполнением (коаксиальная или двухпроводная), которая погружалась в исследуемую среду и позволяла определить границу раздела фаз воздух-жидкость по задержке сигнала отраженного от границы изменения диэлектрического заполнения.

В патенте [2] предложено самокалибрующееся TDR-устройство для измерения уровня жидкости. Отличительной особенностью устройства является использование в конструкции измерительного зонда периодических изолирующих элементов. Элементы обеспечивают позиционирование центрального проводника относительно внешнего экрана и локальное изменение волнового сопротивления зонда в местах установки, позволяющее по откликам от этих локальных изменений проводить процедуру самокалибровки устройства.

В патенте [3] предложена система для определения уровней и электрических характеристик жидких материалов, реализующая TDR-метод. Приводятся экспериментальные рефлектограммы следующих жидкостей: бензин (gasoline), тетрахлорметан (carbonetet), растительное масло (vegetableoil), метиловый спирт (methylalcohol) и вода (H₂O).

Показано [3], что амплитуда отраженного сигнала U_r равна:

$$U_r = U_i \cdot \Gamma, \quad (1)$$

где U_i – амплитуда падающего (зондирующего) сигнала;

Γ – коэффициент отражения от границы раздела фаз, зависящий от относительной диэлектрической проницаемости воздуха ε_1 и жидкости ε_2 :

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}. \quad (2)$$

Диэлектрическая проницаемость жидкости ε_2 может быть определена по формуле:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \left(\frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2. \quad (3)$$

В работе [4] приведен сравнительный анализ различных способов измерения уровня жидкого металла в резервуарах. Среди многообразия анализируемых методов, предпочтение отдано двум методам: ультразвуковому и TDR. Отмечается высокая разрешающая способность TDR метода (менее 2,5 мм), низкая чувствительность к перепадам температуры, отсутствие необходимости в установке внутри резервуаров дополнительных датчиков. Это позволяет использовать метод при высоких температурах (до 800 °С), а также для измерения радиоактивных сред. Отмечена высокая потенциальная дальность определения уровня.

В работе [5] приводятся результаты экспериментальных исследований точности измерения уровня жидкости TDR-методом. В качестве тестовых жидкостей использовались вода, азотная кислота, а также водные растворы хлорида натрия различной концентрации. Положение уровня жидкости определялось по задержке отраженного сигнала, время прихода которого регистрировалось по достижению уровня напряжения сравнения (triggervoltagelevel). Для проверки воспроизводимости результатов измерения наполнение и опорожнение резервуара проводилось в течение нескольких дней.

Было показано [5], что на форму отраженного сигнала, а следовательно и на точность определения задержки влияют свойства жидкости, в частности, концентрация электролита. При увеличении концентрации электролита длительность фронта отраженного импульса уменьшается, что приводит к более ранней фиксации установленного уровня напряжения. Следовательно, для повышения точности измерений, для каждой измеряемой жидкости должна быть произведена процедура калибровки и установлен оптимальный уровень напряжения сравнения. Отмечается [5], что погрешность измерения откалиброванного должным образом измерительного устройства не превышает ± 3 мм.

Описанная в работе [5] необходимость в калибровке системы на каждую измеряемую жидкость устраняется с внедрением ряда методов [6, 7], основанных на анализе формы отраженного сигнала, целью которого является определение «времени полета» (Timeofflight, ToF) электромагнитной волны, вычисление скорости и параметров среды в которой распространяется сигнал.

При анализе однофазных жидкостей задача калибровки системы упрощается тем, что до отражения от границы жидкости сигнал распространяется в воздушной среде, скорость распространения в которой слабо отличается от скорости света. Исключением являются случаи интенсивного испарения измеряемого продукта, а также образование пены на поверхности жидкости.

Учет данных факторов наряду с измерением параметров уровней многофазных жидкостей представляет большой практический интерес.

Применение TDR метода для измерения уровней многофазных жидкостей

Под многофазной жидкостью понимается слоистая структура, состоящая из нескольких несмешивающихся слоев жидкостей (фракций), имеющих различную плотность. Примером многофазной жидкости является среда «воздух-нефть-подтоварная вода» в нефтяной промышленности. Для обеспечения технологии переработки нефти уже недостаточно определения уровня верхнего слоя, необходимо иметь информацию о положении уровней каждого из слоев жидкости.

Первое применение TDR метода для анализа многофазной жидкости описано в [8]. Работа выполнялась в интересах министерства обороны США, целью являлось определение уровней столба топлива, морской воды и воздуха в военных танкерах.

В работе приведена модель распространения сигнала в многослойной структуре и алгоритм определения высот каждого из компонентов многофазной среды по измеренной рефлектограмме погруженного в жидкость коаксиального зонда. В качестве зондирующего сигнала в работе использовался перепад напряжения с фронтом менее 150 пс.

Приводятся [8] выражения для определения высоты столбов воздушной среды D_{air} и топлива D_{oil} по измеренной рефлектограмме:

$$D_{AIR} = c \cdot T_{AIR}, \quad (4)$$

$$D_{OIL} = c \cdot \frac{T_{OIL} \cdot U_{OIL}}{2 \cdot U_{AIR} - U_{OIL}}, \quad (5)$$

где T_{air} – время распространения сигнала до границы раздела "воздух–топливо";
 T_{oil} – время распространения сигнала до границы раздела "топливо–вода";
 U_{air} – амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела "воздух–топливо";
 U_{oil} – амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела "топливо–вода".

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием тестовых жидкостей с широким диапазоном диэлектрических проницаемостей (от 4 до 80) и в различных диапазонах температур (от минус 5 до 45 °С для топлива и от 0 до 80 °С для дистиллированной воды).

В работе [8] отмечено, что метод: обеспечивает высокую линейность (7 мм) и разрешение по длине (5 мм); может быть использован при наличии эмульсии или смешивающихся жидкостей; изменение диэлектрической проницаемости, типа жидкости, температуры, а также наличие загрязнений не приводят к значительным потерям точности измерений.

В работе [9] дано развернутое описание TDR метода, описаны базовые принципы рефлектометрии во временной области, показано применение метода для измерения уровня и границы раздела фаз жидких и сыпучих продуктов. Приведено сравнение с поплавковым, электростатическим, ультразвуковым и радарным методом по различным критериям. К ограничениям использования метода относится измерение вязких сред и сред с высокой турбулентностью. Среди требований к проведению измерений многофазных сред TDR методом указаны следующие: верхний слой измеряемого продукта не должен быть электропроводящим; диэлектрическая проницаемость многофазной жидкости должна возрастать с каждым новым слоем.

В работе [10] предложена измерительная система, реализующая стробоскопический режим измерения, обеспечивающая интервал стробоскопической выборки порядка 17 пс. Кроме того, особенностью является конструкция измерительного зонда со ступенчатым изменением диаметра центрального проводника. Отраженный импульс, возникающий в точке изменения поперечного сечения зонда, используется для калибровки устройства. Для определения длины внутренних слоев жидкости используются априорные значения диэлектрической проницаемости измеряемых жидкостей. Развитие предложенных технических решений нашло отражение в других работах авторов [11, 12].

Аналогичный подход к процедуре калибровки предложен в патенте [13]. Для определения диэлектрической проницаемости газовой среды над жидкостью в конструкции зонда применены регулярные неоднородности, представляющие собой утолщения измерительного стержня. По задержке откликов от регулярных неоднородностей, может быть определена скорость распространения сигнала как в воздушной среде, так и в самой жидкости.

Существенный вклад в развитие TDR метода измерения уровней многофазных жидкостей внесен итальянским коллективом под руководством АндреаКатальдо (AndreaCataldo) [14–23].

Работа [20] посвящена анализу источников неопределенности оценки уровней и диэлектрических проницаемостей жидкостей при использовании техники TDR измерений. Определены и обсуждаются следующие источники погрешностей: неидеальность (нестабильность) соединения кабеля с измерительным зондом; рассогласование измерительного зонда и подводящего кабеля; омические потери в подводящем кабеле и измерительном зонде; частотная зависимость диэлектрической проницаемости измеряемых жидкостей; эффект многократного переотражения сигналов от границ раздела фаз.

Показано, что метод применим для одновременного измерения уровней и диэлектрических проницаемостей жидкостей с неопределенностью в пределах $\pm 2\%$.

В работе [16] особое внимание уделено влиянию потерь на точность измерения уровней TDR методом. Рассматриваются как омические потери в материалах конструкции измерительного зонда, так и потери проводимости, обусловленные рассеянием энергии сигнала в измеряемой жидкости.

Для учета влияния омических потерь применяется калибровка, основанная на измерении коэффициента A измерительного зонда в режимах холостого хода и короткого замыкания:

$$A = \exp(2\alpha L), \quad (6)$$

где α – коэффициент затухания измерительного зонда;
 L – длина измерительного зонда.

В дальнейшем, в процессе обработки результатов измерений, найденное значение коэффициента A используется для корректировки коэффициентов отражения от границ раздела фаз измеряемой жидкости:

$$\Gamma_{КОР} = A \cdot \Gamma_{ИЗМ}, \quad (7)$$

где $\Gamma_{КОР}$ – скорректированный коэффициент отражения;
 $\Gamma_{ИЗМ}$ – измеренный коэффициент отражения.

В работах [17, 22] предложен комбинированный подход к определению частотных характеристик диэлектрических проницаемостей анализируемых жидкостей, позволяющий без увеличения стоимости устройства повысить его точность, делая её сравнимой с точностью векторных частотных измерителей. В основе подхода лежит алгоритм вычисления частотной характеристики коэффициента матрицы рассеяния $S_{11}(f)$ измерительного зонда на основании измеренной рефлектограммы, модель измерительного зонда, учитывающая паразитные параметры конструкции, и алгоритм минимизации невязки характеристик модели и эксперимента, позволяющий определить параметры модели диэлектрической проницаемости жидкости.

Для описания комплексной частотно-зависимой диэлектрической проницаемости в работе использована модель Cole-Cole [22]:

$$\varepsilon_r^*(f) = \left\{ \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \left(j \frac{f}{f_{rel}} \right)^{1-\beta}} \right\} - j \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f \varepsilon_0}, \quad (8)$$

где f_{rel} – частота релаксации диэлектрика;
 ε_∞ – диэлектрическая проницаемость на бесконечной частоте;
 ε_s – статическая диэлектрическая проницаемость;
 ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;
 σ_{dc} – статическая проводимость;
 β – коэффициент, характеризующий рассеяние на частотах релаксации.

Работы [24, 25] посвящены анализу эффекта многократных переотражений сигнала на границах раздела многофазных сред, приводящих к наличию на рефлекто-

грамме паразитных откликов. Наличие таких откликов может привести к неоднозначности интерпретации результатов измерения и ошибке определения уровня. Для устранения данного источника погрешности в [25] предложен алгоритм селекции полезных сигналов.

В [26, 27] выполнен анализ влияния затухания сигнала на точность измерения длин слоев многофазных жидкостей TDR-методом. Для устранения систематической погрешности предложено использовать заранее измеренные характеристики затухания каждого из слоев. Учет затухания в промежуточных слоях позволил обеспечить погрешность измерения уровней не более ± 10 мм [27].

Заключение

Проведенный обзор позволяет выделить следующие основные направления развития TDR метода в задаче измерения уровня однофазных и многофазных жидкостей:

- совершенствование технических характеристик рефлектометров и входящих в них функциональных узлов (генераторов сигналов, приемников, схем формирования опорной частоты) [10–12];
- сочетание временных и частотных методов анализа, с целью определения частотных зависимостей параметров измеряемых сред [17, 22] для повышения точности измерения;
- уточнение модели измерительного зонда, совершенствование алгоритмов решения обратной задачи [17], автоматизация интерпретации рефлектограмм [24, 25];
- совершенствование конструкции измерительного зонда, внедрение алгоритмов калибровки и уточнения параметров исследуемых сред [10, 13] в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерения в промышленности: справ.изд. в 3 кн. Кн. 2. . Способы измерения и аппаратура: пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с.
2. Пат. US3474337. System for sensing levels and electrical characteristics of fluent materials / J.R. Petrick. Заявлено 27.12.1966; Оpubл. 21.10.1969.
3. Пат. US3398578. Self-calibrating liquid-level measuring device/ B.E. Dozer. Заявлено 24.01.1966; Оpubл. 27.08.1968.
4. Liquid metal level measurement (sodium): AEC research and development report: NAA-SR-Memo-12582 / H.W. Slocomb. – Liquid level engineering center, 1968. – 34 p.
5. Time domain reflectometry for liquid level measurement: report: RFP-1902 / G.D. Lehmkuhl. – Albuquerque operations office U.S. atomic energy commission, 1972. – 5 p.
6. Giaquinto N. Accuracy analysis in the estimation of ToF of TDR signals / N. Giaquinto, G.M. D'Aucelli and etc. // IEEE International instrumentation and measurement technology conference (I2MTC). – 2015. – pp. 187–192.
7. Giaquinto N. Criteria for Automated Estimation of Time of Flight in TDR Analysis / N. Giaquinto, G.M. D'Aucelli and etc. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2016. – Vol. 65, № 5 – pp. 1215 – 1224.
8. Harney W.J. Electromagnetic level indicating (EMLI) system using time domain reflectometry / W.J. Harney, C.P. Nemarich // OCEANS '83, Proceedings. – 1983. – pp. 233–236.
9. Nemarich C.P. Time domain reflectometry liquid level sensors // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 2001. – Vol. 4. – pp. 40–44.
10. Gerding M. Precision level measurement based on time-domain reflection (TDR) measurements / M. Gerding, T. Musch, B. Schiek // Advances in Radio Science. – 2002. – pp. 27–31.

11. *Gerding M.* A novel approach for a high precision multi target level measurement system based on time-domain reflectometry / *M. Gerding, T. Musch, B. Schiek* // *Microwave Conference.* – 2005. – Vol. 2. – pp. 27–31.
12. *Gerding M.* A novel approach for a high-precision multitarget-level measurement system based on time-domain reflectometry / *M. Gerding, T. Musch, B. Schiek* // *IEEE Transaction on microwave theory and techniques.* – 2006. – Vol. 54. – pp. 2768–2773.
13. Пат. 2491519 Российская Федерация, МПК G 01 F 23/28. Уровнемер [Текст] / *Законов М.А., Загидуллин М.З.* и др.; Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Инженерный центр «Энергопрогресс». – № 2012107009/28; заявл. 27.02.12; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 23. – 9 с.
14. *Cataldo A.* Remote sensing of liquid characteristics using Time Domain Reflectometry / *A. Cataldo, A. Lay-Ekuakille, C. De Carlo* // *Proceedings of the SPIE.* – 2002. – Vol. 4814. – pp. 465–473.
15. *Cataldo A.* Time Domain Reflectometry technique for monitoring of liquid characteristics / *A. Cataldo, L. Tarricone* and etc. // *Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC). Proceedings of the IEEE.* – 2005. – Vol. 3. – pp. 1932–1936.
16. *Cataldo A.* Simultaneous measurement of dielectric properties and levels of liquids using a TDR method *A. Cataldo, L. Tarricone* and etc. // *Innovative Design and Paradigms in Instrumentation and Measurements.* – 2006. – Vol. 41. – pp. 307–319.
17. *Cataldo A.* A frequency-domain method for extending TDR performance in quality determination of fluids / *A. Cataldo, L. Catarinucci* and etc. // *Measurement science and technology.* – 2007. – Vol. 18. – № 3. – pp. 675–688.
18. *Cataldo A.* An evaluation of performance limits in continuous TDR monitoring of permittivity and levels of liquid materials. / *A. Cataldo, M. Vallone* and etc. // *Measurement.* – 2007. – Vol. 41. – № 3. – pp. 719–730.
19. *Cataldo A.* A TDR Method for Real-Time Monitoring of Liquids / *A. Cataldo, L. Tarricone* and etc. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* – 2007. – Vol. 56. – pp. 1616–1625.
20. *Cataldo A.* Uncertainly Estimation in Simultaneous Measurements of Levels and Permittivities of Liquids Using TDR Technique / *A. Cataldo, L. Tarricone* and etc. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* – 2008. – Vol. 57. – pp. 454–466.
21. *Piuzzi E.* Enhanced Reflectometry measurements of permittivities and levels in layered petrochemical liquids using an “in-situ” coaxial probe / *E. Piuzzi, A. Cataldo, L. Catarinucci* // *Measurement.* – 2009. – Vol. 42. – pp. 685–696.
22. *Cataldo A.* A combined TD-FD method for enhanced reflectometry measurements in liquid quality monitoring / *A. Cataldo, L. Catarinucci* and etc. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* – 2009. – Vol. 58. – № 10. – pp. 3534–3543.
23. *Castiglione P.* The effect of ohmic cable losses on time domain reflectometry measurements of electrical conductivity / *P. Castiglione, P.J. Shouse* // *Soil science society of American journal.* – 2003. – Vol. 67. – № 3. – pp. 414–424.
24. *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.
25. *Тренкаль Е.И.* Алгоритм селекции полезных сигналов в задаче TDR-измерения уровней многофазных жидкостей. *Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов* // *Электроника и микроэлектроника СВЧ.* – 2016. – № 1. – С. 222–226.
26. *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. – pp. 255–266.
27. *Yahya S.I.* A Multi-Level Storage Tank Gauging And Monitoring System Using A Nano-second Pulse // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT).* – 2013. – Vol. 5. – pp. 17–24.