УДК 532.217

Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов

Измерение уровней жидкостей методом импульсной рефлектометрии (обзор)

Рассмотрены основы метода рефлектометрии во временной области (TDR), а также применение метода для решения задачи измерения уровней однофазных и многофазных жидкостей. Представлен анализ существующих публикаций по теме. Рассмотрены перспективные направления развития метода. Ключевые слова: уровнеметрия, рефлектометрия, измерение, TDR, уровень, жидкость. doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-4-67-73

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 многообразия можно выделить следующие наиболее распространенные методы: механический, электростатический, ультразвуковой и микроволновый.

Механический метод является одним из самых простых в реализации и заключается, как правило, либо в контроле положения поплавка (поплавковые уровнемеры), плавающего на поверхности измеряемой жидкости, либо на измерении силы, которая возникает при выталкивании погруженного в измеряемую жидкость буйка (буковые уровнемеры). Недостатком механического метода является наличие подвижных частей, и, как следствие, невозможность применения в средах, образующих налипание или отложение осадка на поплавок или буек.

В основу электростатического метода [2] измерения уровня положен анализ электрической емкости, образованной между электродами, погруженными в жидкую среду. Достоинством метода является отсутствие подвижных частей, недостатком – чувствительность к изменению электрических свойств жидкости, а также непригодность для измерения уровня вязких, пленкообразующих, кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей.

Ультразвуковые уровнемеры [3] используют явление отражения ультразвуковых колебаний от плоскости раздела сред «жидкость – газ». Действие уровнемеров этого типа основано на измерении времени прохождения импульса ультразвука от излучателя до поверхности жидкости и обратно. Достоинством ультразвуковых уровнемеров является возможность дистанционного измерения уровня. К недостаткам можно отнести: зависимость показаний уровня от параметров измеряемых жидкостей (температуры, влажности, давления, концентрации), невысокое пространственное разрешение, сложность получения узкой диаграммы направленности.

Микроволновый метод сочетает в себе преимущества ультразвукового и электростатического методов и основан на анализе электромагнитных откликов от границ раздела сред. В зависимости от конструктивного исполнения могут быть реализованы как контактные (зондовые), так и бесконтактные (радарные) измерения [4]. По принципу действия микроволновые уровнемеры делятся на рефлектометрические с анализом во временной области [5–7] и уровнемеры, использующие частотно-модулированные зондирующие сигналы, позволяющие производить измерение уровня на основе спектральных характеристик отраженного сигнала [8–10]. Последние менее распространены ввиду более высокой стоимости и сложности аппаратной реализации.

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

Основы метода рефлектометрии во временной области

Возникновение и развитие TDR-метода связано с поиском простых и доступных средств диагностики повреждений в линиях передачи [11, 12]. Как известно, линия передачи может быть представлена в виде эквивалентной схемы, представляющей собой последовательное включение элементарных отрезков (рис. 1) бесконечно малой длины Δx , каждый из которых характеризуется погонными параметрами: емкостью *C*, индуктивностью *L*, активным сопротивлением *R* и проводимостью *G*.



Рис. 1. Эквивалентная схема отрезка линии передачи

Волновое сопротивление отрезка линии передачи Z₀ определяется по известной формуле

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} .$$
 (1)

Любые повреждения линии передачи (обрыв, короткое замыкание, отклонение параметров поперечного сечения) приводят к локальному изменению ее импеданса и характеризуются коэффициентом отражения в точке рассогласования, равным

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0},\tag{2}$$

где Z – импеданс в точке возникновения неоднородности.

Для обнаружения и локализации таких повреждений применяется метод рефлектометрии во временной области (TDR). Для этого на вход линии подается зондирующий сигнал (короткий импульс или перепад напряжения), который, распространяясь по линии передачи, частично или полностью отражается от локальных отклонений импеданса. Отраженный сигнал, возвращаясь на вход исследуемой линии, регистрируется приемником. Полученная характеристика напряжения на входе линии передачи от времени называется рефлектограммой.

Анализ рефлектограммы позволяет получить информацию о продольной структуре линии передачи, имея возможность подключения лишь к одному из ее входов.

По задержке отраженных сигналов относительно зондирующего возможно определение положений неоднородностей в линии передачи:

$$l = \frac{\upsilon \cdot \tau_{\rm o}}{2}, \qquad (3)$$

где υ – скорость распространения электромагнитной волны в линии; τ_0 – задержка отраженного сигнала; l – расстояние до неоднородности в кабеле.

По форме отраженного сигнала могут быть определены тип неоднородности [11] и ее частотные характеристики [13].

Наглядность и простота технической реализации сделали TDR-метод востребованным для решения прикладных задач в различных отраслях, в том числе в задаче измерения уровня 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 [14, 15]. 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 [14] предложено самокалибрующееся TDR-устройство для измерения уровня жидкости. Устройство [14] содержит генератор прямоугольных импульсов, стробоскопический осциллограф и измерительный зонд, выполненный в виде коаксиальной линии с воздушным заполнением, погруженный в сосуд. Отличительной особенностью устройства является использование в конструкции измерительного зонда периодических изолирующих элементов, которые обеспечивают две функции:

 точное позиционирование центрального проводника относительно внешнего экрана;

 локальное изменение волнового сопротивления зонда в местах установки.

На измеренной рефлектограмме кроме сигнала, отраженного от границы раздела фаз «воздух – жидкость», будут присутствовать периодические сигналы, вызванные отражениями от изолирующих элементов.

Наличие таких откликов позволяет обеспечить привязку временной оси рефлектограммы к координате по длине измерительного зонда (самокалибровку устройства).

В патенте [15] предложена система для определения уровней и электрических характеристик жидких материалов, реализующая TDR-метод. Система содержит генератор прямоугольных импульсов, осциллограф и измерительный зонд, погруженный в сосуд с исследуемой жидкостью. Приводятся экспериментальные рефлектограммы следующих жидкостей: бензин (gasoline), тетрахлорметан (carbone tet), растительное масло (vegetable oil), метиловый спирт (methyl alcohol) и вода (H₂O).

Показано [5], что амплитуда отраженного сигнала U_r тем больше, чем сильнее отличие относительных диэлектрических проницаемостей слоев ε_1 (воздух) и ε_2 (исследуемая жидкость).

При этом коэффициент отражения Г на границе раздела фаз равен

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \,. \tag{4}$$

Амплитуда отраженного сигнала U_r для идеализированного случая, при котором потерями в линии можно пренебречь, равна

$$U_r = U_i \cdot \Gamma , \qquad (5)$$

где U_i – амплитуда падающего (зондирующего) сигнала.

Диэлектрическая проницаемость жидкости ϵ_2 может быть определена по формуле

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \left(\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma}\right)^2. \tag{6}$$

Скорость распространения электромагнитного сигнала на отрезке зонда, погруженного в исследуемую жидкость, равна

$$v_2 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_2}},\tag{7}$$

где *с* – скорость света.

В работе [16] приведен сравнительный анализ различных способов измерения уровня жидкого металла в резервуарах. Среди многообразия анализируемых методов предпочтение отдано двум методам: ультразвуковому и TDR. Отмечаются 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 °C), а также для измерения радиоактивных сред. Отмечена высокая потенциальная дальность определения уровня.

В работе [17] приводятся результаты экспериментальных исследований точности измерения уровня жидкости TDR-методом. Экспериментальная установка содержит: генератор прямоугольных импульсов (HP 1905A); формирователь фронта (HP 1920A); измеритель временных интервалов (HP 5379A, HP 5360A, HP 5375A); измерительный зонд, выполненный в виде коаксиальной линии передачи с воздушным заполнением, и резервуар из нержавеющей стали. Для контроля уровня жидкости в боковой стенке резервуара было выполнено смотровое окно и установлена линейка, позволяющая производить измерения уровня с точностью 0,5 мм.

Измерения выполнялись в режиме воздействия последовательностью прямоугольных импульсов с частотой следования 1 кГц, амплитудой 5 В и длительностью фронта, равной 500 пс. 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 достижении уровня напряжения сравнения (trigger voltage level). Для проверки воспроизводимости результатов измерения наполнение и опорожнение резервуара проводились в течение нескольких дней.

Было показано [17], 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 [17], что погрешность измерения откалиброванного должным образом измерительного устройства не превышает ± 3 мм.

Описанная в работе [17] необходимость в калибровке системы на каждую измеряемую жидкость устраняется с внедрением ряда методов [18, 19], основанных на анализе формы отраженного сигнала, целью которого является определение «времени полета» (Time of flight, 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 [6]. Работа выполнялась в интересах Министерства обороны США, целью являлось определение уровней столба топлива, морской воды и воздуха в военных танкерах.

В работе приведены 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. Эквивалентный интервал дискретизации измерительной установки составлял 25 пс.

Приводятся [6] выражения для определения высоты столбов воздушной среды D_{AIR} и топлива D_{OIL} по измеренной рефлектограмме:

$$D_{\rm AIR} = c \cdot T_{\rm AIR} , \qquad (8)$$

$$D_{\text{OIL}} = c \cdot \frac{T_{\text{OIL}} \cdot U_{\text{OIL}}}{2 \cdot U_{\text{AIR}} - U_{\text{OIL}}}, \qquad (9)$$

где T_{AIR} – время распространения электромагнитного сигнала до границы раздела фаз «воздух – топливо»; T_{OIL} – время распространения электромагнитного сигнала до границы раздела фаз «топливо – морская вода»; U_{AIR} – амплитуда сигнала отраженного от границы раздела фаз «воздух – топливо»; U_{OIL} – амплитуда сигнала отраженного от границы раздела фаз «топливо – морская 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 °C для топлива и от 0 до 80 °C для дистиллированной воды).

В работе [6] отмечено следующее:

 системы, обеспечивающие согласование измерительного зонда с подводящим кабелем и выходом рефлектометра, позволяют получить лучшее пространственное разрешение; предлагаемая установка, реализующая TDR-метод, обеспечивает высокую линейность измерений (выше 7 мм) и разрешение по длине (до 5 мм);

 – система может быть использована для определения высоты столбов топлива и морской воды при наличии эмульсии или смешивания жидкостей;

 изменение диэлектрической проницаемости, типа жидкости, температуры, а также наличие загрязнений не приводят к значительным потерям точности измерений.

В работе [5] 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 [20] предложена измерительная система, реализующая стробоскопический режим измерения. Функция автоматического сдвига по времени между зондирующим и стробирующим сигналами реализована путем использования двух опорных генераторов с незначительной отстройкой частоты. При частоте следования импульсов f_0 , равной 20 МГц, и величине отстройки Δf равной 6,8 кГц, обеспечивается интервал стробоскопической выборки порядка 17 пс. Использование стробоскопического смесителя позволяет зарегистрировать рефлектограмму путем обработки N откликов объекта на тестовое воздействие.

Кроме того, особенностью [20] является конструкция измерительного зонда, выполненного в виде коаксиальной линии 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 [21, 22].

Аналогичный подход к процедуре калибровки предложен в патенте [23]. Для определения диэлектрической проницаемости газовой среды над жидкостью в конструкции зонда применены регулярные неоднородности, представляющие собой утолщения измерительного стержня (см. рис. 2, *a*).

По задержке откликов от регулярных неоднородностей может быть определена скорость распространения сигнала как в воздушной среде, так и в самой жидкости.



Рис. 2. Зонд с регулярными неоднородностями и его рефлектограмма [23]

Существенный вклад в развитие TDR-метода измерения уровней многофазных жидкостей внесен итальянским коллективом под руководством Адреа Катальдо (Andrea Cataldo) [24–31].

Работа [29] 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 ±2%.

В работе [25] 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, которая состоит в измерении коэффициентов отражения в режимах короткого замыкания и холостого хода на выходе измерительного зонда. Считается, что отклонение модуля коэффициента от отражения от единицы вызвано омическими потерями, величина которых определяется коэффициентом *A*, равным

$$A = \exp(2\alpha L), \qquad (10)$$

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

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

$$\Gamma_{\rm KOP} = A \cdot \Gamma_{\rm M3M} \,, \tag{11}$$

где Г_{КОР} – скорректированный коэффициент отражения; Г_{ИЗМ} – измеренный коэффициент отражения.

Экспериментально показано [25], что предложенная методика позволяет устранить систематическую погрешность измерения уровня, значение которой на практике может составлять от 1 до 2,4% в зависимости от диэлектрической проницаемости измеряемой жидкости.

Также в работе [25] рассмотрена процедура определения погонной проводимости жидкости. Выражение для определения проводимости, согласно предложенной процедуре, имеет вид

$$\sigma = K_p G_s = \frac{K_p 1 - \Gamma_{\infty}}{Z_0 1 + \Gamma_{\infty}},$$
(12)

где K_P – коэффициент формы измерительного зонда; Z_0 – волновое сопротивление; Γ_{∞} – коэффициент отражения, полученный в режиме большой временной выдержки [32].

Сущность метода заключается в определении коэффициента формы *K_P* измерительного зонда по результатам продолжительных TDR-измерений тестовой жидкости с известной характеристикой проводимости, после чего найденный коэффициент *K_P* может быть использован для измерения проводимости неизвестной жидкости.

В работах [26, 31] предложен комбинированный подход к определению частотных характеристик диэлектрических проницаемостей анализируемых жидкостей. 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 [26]:

$$\varepsilon_r^*(f) = \left\{ \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{\rm s} - \varepsilon_{\infty}}{1 + \left(j\frac{f}{f_{\rm rel}}\right)^{1-\beta}} \right\} - j\frac{\sigma_{\rm dc}}{2\pi f \varepsilon_0} , \qquad (13)$$

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.

В работах [26, 31] дано сравнение разработанного комбинированного подхода с техникой измерения диэлектрической проницаемости при помощи векторных анализаторов цепей (VNA). Показано, что комбинированный подход на основе TDR-измерений с последующим расчетом частотных характеристик позволяет без увеличения стоимости устройства повысить его точность, делая её сравнимой с точностью векторных частотных измерителей.

Работы [33, 34] посвящены анализу эффекта многократных переотражений сигнала на границах раздела многофазных сред. На модели распространения сигнала в трехфазной среде (рис. 3) сплошной кривой показаны траектории сигналов, вызванных однократным отражением зондирующего сигнала от границы раздела сред, – откликов первого порядка.



Рис. 3. Модель распространения сигналов

Кроме откликов первого порядка, на вход рефлектометра поступают и дополнительные отклики, вызванные многократным отражением сигналов от границы раздела фаз, – отклики высших порядков.

На рис. 4 приведен пример рефлектограммы многофазной жидкости со следующими параметрами слоев: $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 3$, $\varepsilon_3 = 80$, $l_1 = 0,65$ м, $l_2 = 0,25$ м, $l_3 = 0,1$ м.



в многофазной среде

Рефлектограмма (см. рис. 4) содержит: зондирующий сигнал (поз. 1); отклики первого порядка (поз. 2–4); отклики высших порядков (поз. 5).

Наличие откликов высших порядков на рефлектограмме может привести к неоднозначности интерпретации результатов измерения и ошибке определения уровня. Для устранения данного источника погрешности в [34] предложен алгоритм селекции полезных сигналов.

В [35, 36] выполнен анализ влияния затухания сигнала на точность измерения толщин 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 [36].

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) [20–22] для повышения разрешающей способности по дальности и снижения инструментальной погрешности средств измерения;

 сочетание временных и частотных методов анализа с целью определения частотных зависимостей параметров измеряемых сред [26, 31] и их учет при определении толщин слоев;

 уточнение модели измерительного зонда, совершенствование алгоритмов решения обратной задачи [26], автоматизация интерпретации рефлектограмм [33, 34];

• совершенствование конструкции измерительного зонда, а также внедрение алгоритмов калибровки и уточнения параметров исследуемых сред [20, 23] в реальном масштабе времени.

В качестве возможного перспективного направления развития TDR-технологии измерения параметров жидких многослойных сред следует упомянуть методы нелинейной рефлектометрии [37, 39] и нелинейной сверхширокополосной радиолокации [38], успешно применяющиеся для решения близких по технической сущности задач измерения и диагностики.

Литература

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. Guirong L. A capacitive liquid level sensor with four electrodes / L. Guirong, C. Shuyue // 2010 3rd international conference on computer science and information technology (ICCSIT). – 2010. – Vol. 4. – PP. 628–632.

3. Spratt W. Liquid level torsional ultrasonic waveguide sensor / S. Spratt, J. Vetelino, L. Lynnworth // 2009 IEEE international ultrasonic symposium (IUS). – 2009. – P. 663–668.

4. Anderson D. Non-contact Radar vs. Guided Radar // Measurement and control. – 2011. – Vol. 44, Iss. 10. – PP. 308–312.

5. Nemarich C.P. Time domain reflectometry liquid level sensors // IEEE instrumentation & measurement magazine. – 2001. – Vol. 4, Iss. 4. – PP. 40–44.

6. 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.

7. Cataldo A. Time Domain Reflectometry technique for monitoring of liquid characteristics / A. Cataldo, L. Tarricone and etc. // 2005 IEEE Instrumentation and measurement technology conference proceedings. – 2005. – Vol. 3. – PP. 1932– 1936.

8. Weiss M. Novel method of measuring impurity levels in liquid tanks / M. Weiss, R. Knochel // 1997 IEEE MTT-S international microwave symposium digest. – 1997. – Vol. 3. – PP. 1651–1654. 9. Zeng-rong Z. The design of FMCW radar liquid level measuring system based on FPGA / Z. Zeng-rong, Q. Yao-hui // 2014 IEEE Workshop on advanced research and technology in industry applications (WARTIA). – 2014. – PP. 536–538.

10. Brumbi D. Low power FMCW radar system for level gaging // 2000 IEEE MTT-S International microwave symposium digest. – 2000. – Vol. 3. – PP. 1559–1562.

11. Глебович Г.В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский и др., под ред. Г.В. Глебовича. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

12. Jones S.B. Time domain reflectometry measurement principles and application / S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or // Hydrological processes. – 2002. – Vol. 16, Iss. 1. – PP. 141–153.

Лощилов А.Г. Цифровой измерительный комплекс для измерения частотных и импульсных характеристик четырехполюсников / А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин // Известия Том. политехн. ун-та. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – Т. 309, № 8. – С. 37–42.

14. Пат. 3474337 US, MПК G01F23/284. System for sensing levels and electrical characteristics of fluent materials / J.R. Petrick. Заявлено 27.12.1966; опубл. 21.10.1969.

15. Пат. 3398578 US, МПК G01F23/284. Selfcalibrating liquid-level measuring device/ В.Е. Dozer. Заявлено 24.01.1966; опубл. 27.08.1968.

16. Liquid metal level measurement (sodium): AEC research and development report: NAA-SR-Memo-12582 / H.W. Slocomb. – Liquid level engineering center, 1968. – 34 p.

17. Time domain reflectometry for liquid level measurement: report: RFP-1902 / G.D. Lehmkuhl. – Albuquerque operations office U.S. atomic energy commission, 1972. – 5 p.

18. Accuracy analysis in the estimation of ToF of TDR signals / N. Giaquinto, G.M. D'Aucelli and etc. // 2015 IEEE international instrumentation and measurement technology conference (I2MTC) proceedings. – 2015. – PP. 187–192.

19. 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, Iss. 5. - P. 1215–1224.

20. Gerding M. Precision level measurement based on time-domain reflection (TDR) measurements / M. Gerding, T. Musch, B. Schiek // Advances in radio science. -2002. -Vol. 1. - PP. 27–31.

21. 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 // 2005 European microwave conference. -2005. – Vol. 2. – 4 p.

22. 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, Iss. 6. – PP. 2768–2773.

23. Пат. 2491519 РФ, МПК G01F23/28. Уровнемер [Текст] / Законов М.А., Загидуллин М.З. и др. – № 2012107009/28; заявл. 27.02.12; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 23. – 9 с.

24. Cataldo A. Remote sensing of liquid characteristics using Time Domain Reflectometry / A. Cataldo, A. Lay-Ekuakille, C. De Carlo // 2005 SPIE proceeding – 2002. – Vol. 4814. – PP. 465–473.

25. Cataldo A. Simultaneous measurement of dielectric properties and levels of liquids using a TDR method / A. Cataldo, L. Tarricone and etc. // Measurement. – 2008. – Vol. 41, Iss. 3. – PP. 307–319.

26. 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, No. 3. – PP. 675–688.

27. 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. – 2008. – Vol. 41, Iss. 7. – PP. 719–730.

28. 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, Iss 5. – PP. 1616–1625.

29. Cataldo A. Uncertainty 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, Iss. 3. – PP. 454–466.

30. Piuzzi E. Enchanced 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, No. 5. – PP. 685–696.

31. 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, Iss. 10. – PP. 3534–3543.

32. 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, No. 2. – PP. 414–424.

33. Лощилов А.Г. Модель измерительной системы для рефлектометрического анализа параметров многофазной жидкости / А.Г. Лощилов, Е.И. Тренкаль // 25-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: матер. конф. – Севастополь, 2015. – С. 888–889.

34. 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.

35. 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.

36. Yahya S.I. A multi-level storage tank gauging and monitoring system using a nanosecond pulse // International journal of engineering trends and technology (IJETT). -2013. - Vol. 5, No. 1. - PP. 17–24.

37. Лощилов А.Г. Экспериментальная установка для исследования характеристик нелинейности СВЧ-цепей в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия / А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин // Доклады ТУСУРа. – 2010. –№ 2 (22), ч. 1. –С. 161–165.

38. Loschilov A.G. Instrumentation for nonlinear distortion measurements under wideband pulse probing / A.G. Loschilov, E.V. Semyonov et al. // Proceedings of 19-th International Crimean Conference «Microwave& Telecommunication Technology» (CriMiCo'2009). – 2009. – Vol. 2. – PP. 754–755.

39. Лощилов А.Г. Разработка принципов нелинейной сверхширокополосной радиолокации // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 4 (30). – С. 31–38.

Тренкаль Евгений Игоревич

Аспирант каф. конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР) ТУСУРа Тел.: +7-913-816-57-16 Эл. почта: trenkal@mail.ru

Лощилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, зав. каф. конструирования узлов и деталей РЭА, начальник СКБ «Смена» Тел.: +7-906-947-69-20 Эл. почта: main@skbsmena.ru

Trenkal E.I., Loschilov A.G.

Measurement of liquid levels using time-domain reflectometry method

In this paper the basis of the time domain reflectometry (TDR) method and application for level measurement of single-phase and multiphase liquids are considered. The analysis of the existing publications is presented. The promising directions of the method development are considered.

Keywords: reflectometry, measurement, liquid, level, TDR.