

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 681.128

**ПАССИВНАЯ РЕФЕРЕНСНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ В ЗАДАЧЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ И ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ СРЕД**

**©2025 г. Е. И. Тренкаль^{а,*}, А. В. Берестов^а, В. С. Поздняков^а,
Я. А. Петененко^а**

^аТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Россия, Томск, 634050, пр. Ленина, 40

**e-mail: trenkal@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.03.2025 г.

После доработки 18.04.2025 г.

Принята к публикации 26.05.2025 г.

Предложен метод пассивной референсной рефлектометрии, основанный на использовании в тракте референсов с известной локализацией и неизменяемым коэффициентом отражения. Выполнено сравнение способов реализации пассивных референсов. Для повышения надежности идентификации предложено использовать в качестве референса парные неоднородности тракта, формирующие пару откликов с противоположной полярностью. Согласно проведенному модельному и экспериментальному исследованию с использованием коаксиального зонда длиной 519 мм, диаметрами экрана и центрального проводника 12 мм и 5 мм соответственно, с включением пяти равноудаленных парных референсов сделан вывод о применимости способа пассивной референсной рефлектометрии для определения относительной диэлектрической проницаемости по длине тракта. Для данного зонда при выполнении измерения многослойной среды, состоящей из воздуха, технического масла и дистиллированной воды, экспериментальная погрешность относительной диэлектрической проницаемости составила менее 7.9%, для случаев нахождения границ раздела вблизи референсов – до 34.7%. Таким образом, применение предложенного способа позволяет определить или уточнить относительную диэлектрическую проницаемость слоев, что может быть полезно в задачах уровнеметрии для повышения точности определения уровней и получения сведений о качественных характеристиках слоев многослойных сред.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рефлектометрия во временной области (TDR) широко применяется в науке и технике для решения различных задач, начиная с определения и локализации неисправностей в кабельных сетях судов, воздушного и космического транспорта, заканчивая измерением уровней, параметров почв, бетонных конструкций и микросхем [1–5]. Стандартный формат применения метода предполагает расчет расстояния до неоднородности в тракте на основе измерения задержки отраженного сигнала. Однако для оценки расстояния должна быть известна скорость распространения сигнала, зависящая от диэлектрической и магнитной проницаемостей тракта, которые,

как правило, достоверно неизвестны. Это является источником погрешности метода и значительно ограничивает его применение для многослойных структур или трактов со слабо предсказуемыми параметрами.

Требуемые диэлектрические параметры тракта могут быть определены альтернативными методами, если это позволяет область применения. Например, в задаче многофазной уровнеметрии параметры жидких сред могут быть определены путем отбора и лабораторного исследования проб или использованием специализированного погружного оборудования. В той же области известен факт значительного изменения диэлектрической проницаемости газовой среды из-за наличия испарения, что решается внесением в измерительный прибор ее диэлектрической проницаемости [6], которая также должна быть заранее определена дополнительным оборудованием. Одним из подходов, применяемых для преодоления этого ограничения, является использование в тракте специально создаваемой неоднородности с известной локализацией, реализуемой, например, путем изменения волнового сопротивления измерительного зонда [7]. Задержка отклика от неоднородности относительно тестового воздействия позволяет определить скорость распространения сигнала в газовой среде и, следовательно, ее среднюю диэлектрическую проницаемость.

Попытки масштабирования этого подхода предпринимались в работе [8], где было предложено увеличить количество специально создаваемых неоднородностей, сделав их периодическими. Фактически, речь идет о расширении функционала стандартной рефлектометрии с добавлением возможности определения распределения диэлектрической проницаемости по всей длине. В связи с этим целесообразно будет определить отдельное направление развития метода TDR, корректным названием которого является референсная рефлектометрия, в основе которой заложен анализ откликов от специально созданных неоднородностей с известной локализацией, так называемых временных “референсов”.

В работе [9] предложено создание референсов путем изменения волнового сопротивления измерительного тракта геометрией проводников. Очевидным недостатком является усложнение процесса анализа рефлектограммы, что может быть решено использованием “активных” референсов с изменяемым коэффициентом отражения [8]. Однако совокупность простоты и надежности реализации “пассивных” устройств создает перспективу для решения задачи автоматического анализа измеряемых данных.

Таким образом, целями данной работы являются анализ и оценка метода пассивной референсной рефлектометрии в задаче определения уровней и диэлектрических параметров жидких сред.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ПАССИВНОЙ РЕФЕРЕНСНОЙ

РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Метод рефлектометрии во временной области основывается на оценке расстояния до объекта по временной задержке отраженного тестового сигнала – отклика. Отклик в линии передачи возникает вследствие локального изменения ее волнового сопротивления, характеризуемого выражением [10]

$$Z_0(f) = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}, \quad (1)$$

где R, G, L, C – первичные параметры используемой линии передачи, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, i – мнимая единица.

Величина формируемого отклика определяется коэффициентом отражения Γ , который зависит от соотношения волнового сопротивления исходной линии Z_0 и импеданса Z в точке возникновения неоднородности:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}. \quad (2)$$

Комплексное представление, включающее фазовую задержку и амплитуду спектральной составляющей частоты f отраженного от неоднородности сигнала $U_{\text{отр}}(f)$, может быть определено выражением [10]

$$U_{\text{отр}}(f) = U_T(f) \cdot e^{2(\alpha + i\beta)l} \cdot \Gamma = U_T(f) \cdot e^{2\alpha l} \cdot e^{2i\omega l/v}, \quad (3)$$

где $U_T(f)$ – амплитуда спектральной составляющей тестового сигнала, α, β – коэффициенты затухания и фазы коэффициента распространения γ , l – длина фрагмента линии передачи, v – скорость распространения сигнала.

Выражение (3) по значению задержки тестового сигнала $\tau = 2l/v$ позволяет оценить расстояние до неоднородности или при известном расстоянии до неоднородности определить скорость распространения в среде и ее относительную диэлектрическую проницаемость

$$\epsilon_r = (\tau c / 2l)^2. \quad (4)$$

Технология референсной рефлектометрии основана на использовании в измерительном тракте множества референсов (отражателей). Их расположение по длине измерительного тракта и свойства могут быть определены в зависимости от задачи. Однако наиболее распространенным подходом может являться реализация равномерных систем, в которых референсы располагаются равномерно на заданном расстоянии друг от друга. Наиболее простой макромоделью в первом приближении будет являться описание каждого референса через параметр коэффициента отражения Γ (рис. 1).

Для подобной структуры эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость каждого сегмента определяется временной позицией τ_i отклика от неоднородности Γ_i , она может быть охарактеризована выражением

$$\varepsilon_{ri}^{\text{ЭКВ}}(x) = \left(\frac{(\tau_i - \tau_{i-1})c}{2l_i} \right)^2, \quad (5)$$

которое в совокупности формирует дискретное распределение диэлектрической проницаемости по длине (координате x) измерительного тракта. Очевидно, изменение параметра диэлектрической проницаемости в рамках сегмента приводит к ее ошибочному определению, однако в этом случае наличие идентифицируемого отклика от границы раздела позволяет применять усовершенствованные алгоритмы анализа [8].

“Пассивная” рефлектометрия основывается на использовании в тракте пассивных отражателей – элементов с коэффициентом отражения $\Gamma = \text{const}$. Их реализация может быть выполнена 1) ступенчатым изменением свойств тракта, именно диэлектрических параметров или геометрии проводников, что приводит к изменению Z_0 ; 2) включением в тракт нагрузки с заданным импедансом Z_n , реализованной в форме пассивных компонентов с линейными свойствами (резисторов, конденсаторов, индуктивностей, фильтров и др.); 3) их комбинациями с получением дополнительных полезных свойств.

На основе параметра S_{11} матрицы рассеяния $[S]$ и уравнений передачи матрицы $[a]$ получены выражения связи коэффициента отражения Γ и импеданса Z_n неоднородности тракта [11]. В табл. 1 представлены варианты исполнения референсов, их особенности и выражения для расчета коэффициента отражения Γ при известных параметрах тракта или импеданса.

Таблица 1. Варианты исполнения локальных отражателей и их расчет

Вариант №	1	2	3	4	5
Наименование	Изменение геометрии проводников	Изменение диэлектрика	Параллельная нагрузка	Последовательная нагрузка	Бинарный референс
Вариант исполнения					
Расчет коэффициента отражения	$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$	$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r0}} - \sqrt{\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r0}} + \sqrt{\varepsilon_{r1}}}$	$\Gamma(f) = -\frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_n(f)}$	$\Gamma(f) = -\frac{Z_n(f)}{Z_n(f) + 2Z_0}$	$\Gamma^1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \Gamma^2 = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1}$
Расчет параметра неоднородности	$Z_i = -Z_0 \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1}$	$\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r0} \frac{(\Gamma - 1)^2}{(\Gamma + 1)^2}$	$Z_n(f) = -Z_0 \frac{\Gamma(f) + 1}{2\Gamma(f)}$	$Z_n(f) = -Z_0 \frac{\Gamma(f) + 1}{2\Gamma(f)}$	$Z_1 = -Z_0 \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1}$
Напряжение на выходе	$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} (1 + \Gamma)$		$U_{\text{вых}}(f) = U_{\text{вх}}(f)(1 + \Gamma(f))$		$U_{\text{вых}} \geq U_{\text{вх}} (1 - \Gamma^2) e^{al}$

Принимая в качестве критерия идентифицируемости отклика параметр пороговой чувствительности δ , равный амплитуде минимального идентифицируемого отклика $U_{\min}$, мы можем определить условие

$$|U_{\min}| > kU_{\text{ш}},$$

где $k=2\dots 10$ – коэффициент запаса для обеспечения возможности надежной идентификации отклика на фоне шума, $U_{\text{ш}}$ – амплитуда паразитного шума с учетом амплитуд паразитных откликов от неоднородностей измерительного тракта. Тогда для вариантов исполнения из табл. 1 могут быть определены выражения для вычисления максимального числа отражателей рефлектометрического измерительного устройства:

Варианты №1, 2, 5:

$$q_{\max} = \text{floor} \left(\left[\lg_{1-\Gamma^2} \left(\frac{\delta}{|U_T \Gamma|} \right) + 1 \right] e^{2\alpha L} \right) = \text{floor} \left(\left[\frac{\ln(\delta / |U_T \Gamma|)}{\ln(1-\Gamma^2)} + 1 \right] e^{2\alpha L} \right), \quad (6)$$

Варианты №3, 4:

$$q_{\max} = \text{floor} \left(\left[\frac{1}{2} \lg_{1+\Gamma} \left(\frac{\delta}{|U_T \Gamma|} \right) + 1 \right] e^{2\alpha L} \right) = \text{floor} \left(\left[\frac{\ln(\delta / |U_T \Gamma|)}{2 \ln(1-\Gamma)} + 1 \right] e^{2\alpha L} \right), \quad (7)$$

где $\text{floor}(x)$ – функция округления x вниз до целого, L – общая длина измерительного тракта.

В табл. 2 представлен расчет по выражениям (6) и (7) максимального числа отражателей для нескольких вариантов коэффициента отражения Γ и коэффициента затухания α измерительной линии длиной 1 м при амплитуде тестового сигнала $U_T = 1$ В, $\delta = 50$ мВ.

Таблица. 2. Максимальное число отражателей

Коэффициент затухания α , дБ/м		$\alpha = 0$			$\alpha = 0.25$ дБ/м			$\alpha = 1$ дБ/м		
Коэффициент отражения Γ		–0.1	–0.2	–0.3	–0.1	–0.2	–0.3	–0.1	–0.2	–0.3
$q_{\max}$	Варианты исполнения №1, №2, №5	69	34	19	42	21	12	9	4	2
	Варианты исполнения №3, №4	4	4	3	2	2	2	0	0	0

Согласно табл. 2, наибольшее число референсов достижимо при использовании вариантов №1, №2, №5 (табл. 1), что связано с зависимостью знака коэффициента отражения Γ от направления распространения волны в линии. Как было упомянуто ранее, по выражению (5) может быть рассчитано дискретное распределение относительной диэлектрической проницаемости по длине измерительной линии. С этой точки зрения количество референсов определяет разрешающую способность диэлектрической проницаемости по расстоянию. Например, при $\alpha = 0.25$ дБ/м и $|\Gamma| \leq 0.2$ эквивалентная разрешающая способность по расстоянию имеет значение менее 50 мм.

Следует отметить, что выражения (6) и (7) не учитывают влияние интерференции откликов высших порядков, описание и механизм возникновения которых подробно представлены в работе [8]. Влияние наложения откликов особенно актуально для измерительных линий с равномерно распределенными по длине отражателями. Очевидно, степень отклонения амплитуды отраженного от неоднородности сигнала вследствие наложений откликов высших порядков возрастает от начала к концу измерительной линии. При этом для вариантов исполнения №1, №2 и №5 наложение приводит к убыванию амплитуды результирующего отклика, для вариантов №3 и №4, напротив, к возрастанию амплитуды. Это говорит о том, что выражение (7) является достаточным для расчета минимального числа отражателей. Применение выражений (6) и (7) для точного расчета допустимо при условии наличия потерь, достаточных для рассеяния переотраженного сигнала при прохождении прямого и обратного путей в рамках одного сегмента между соседними референсами.

Вариант исполнения №5 (табл. 1) интересен по нескольким причинам:

- 1) по сравнению с вариантами №1 и №2 технологии расчета и изготовления проще в связи с чередованием двух вариантов волнового сопротивления – без монотонного увеличения/снижения от референса к референсу;
- 2) идентификация откликов на фоне откликов от границ раздела сред алгоритмически может быть упрощена по причине ожидаемого чередования полярности откликов – отсутствие одного из откликов на рефлектограмме будет говорить о его наложении на отклик от границы раздела фаз, что может быть заложено в алгоритмы автоматического анализа устройства, однако возможна неверная интерпретация при совпадении полярностей двух последовательных откликов от границы раздела и референса;
- 3) уменьшение расстояния между двумя соседними референсами до длительности, близкой к пространственному распределению тестового сигнала, формирует бинарный референс и позволяет рассматривать пару откликов как единый отклик, близкий по форме к моноциклу Гаусса при условии $l_p/v_p \approx \tau_f$, где l_p – длина референса, v_p – скорость распространения в локальном элементе, τ_f – длительность фронта тестового сигнала; при большем снижении два отклика будут накладываться и компенсировать друг друга, снижая собственную амплитуду; текущий вариант реализации позволяет упростить идентификацию на фоне откликов от границ раздела и исключить проблемы интерпретации, в связи с чем представляет интерес его модельное и экспериментальное исследование.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ РЕФЕРЕНСОВ

С целью анализа метода пассивной референсной рефлектометрии на базе бинарных референсов была разработана модель структуры с коаксиальной линией передачи, в которой роль бинарного референса выполняла проточка малой длины в центральном стержне. Глубина проточки определялась таким образом, чтобы обеспечить заданный коэффициент отражения. Параметры модели:

- исходный диаметр экрана коаксиальной линии $D = 12$ мм;
- исходный диаметр центрального проводника (стержня) $d = 5$ мм;
- глубина проточки (рис. 2) составляет 1 мм при $d_1 = 4$ мм и 2 мм при $d_1 = 3$ мм;
- количество референсов $q = 5$;
- расстояние между референсами $l_{p-p} = 85$ мм;
- длина измерительного зонда $L = 519$ мм;
- тип тестового сигнала – прямоугольный импульс;
- длительность фронтов тестового сигнала $\tau_f = 100$ пс;
- длительность тестового сигнала по уровню 0.1 составляет $\tau \approx 450$ пс.

При используемых геометрических параметрах волновое сопротивление исходной коаксиальной линии $Z_0 = 52.5$ Ом. При $d_1 = 4$ мм и $d_1 = 3$ мм волновое сопротивление проточки $Z_1 = 65.9$ Ом и $Z_1 = 83.1$ Ом, что определяет коэффициенты отражения $\Gamma = 0.113$ и $\Gamma = 0.226$ соответственно. Модель измерительной линии и ее рефлектограмма представлены на рис. 2.

На полученной рефлектограмме (рис. 2) можно отметить следующее:

- 1) величины амплитуды верхней и нижней полуволн сравнимы, что является результатом интерференции исходного отклика от конца бинарного референса и многократно переотраженных в рамках проточки сигналов;
- 2) отклики от начала к концу измерительной линии претерпевают “растягивание” во времени, что происходит по причине интерференции переотраженных сигналов на выходе каждого бинарного референса.

Определение распределения относительной диэлектрической проницаемости по длине по выражению (5) требует корректной оценки временных позиций откликов. При использовании измерительной линии коаксиального исполнения при воздушном диэлектрике отклонение временной позиции от реального значения на более чем 30 пс приводит к абсолютной погрешности определения относительной диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon_r > 0.1$. Столь малое значение обосновывает необходимость использования тестовых сигналов сверхмалой длительности и подтверждает важность выбора методов обработки рефлектограмм.

Анализ подходов оценки времени распространения сигнала (Time of Flight, ToF) представлен в работе [12]. Наиболее точные способы анализа основываются на определении временной

позиции начала отклика, для чего довольно часто используется вычисление и анализ производной измеренной рефлектограммы. Однако для автоматизированного анализа сложных структур наиболее простым и надежным способом является поиск экстремумов.

В рассматриваемом способе измерения на базе бинарных референсов может быть использован комбинированный подход, в котором определение временных положений откликов от референсов выполняется по положениям максимального $t_i^{\max}$ и минимального экстремумов $t_i^{\min}$. На рис. 3 представлен фрагмент рефлектограммы с указанием ключевых временных позиций откликов.

Отклик (рис. 4) имеет два экстремума ($t_i^{\max}$ и $t_i^{\min}$), которые с учетом корректировки на длительность фронта, на первый взгляд, характеризуют начало и конец бинарного референса, а их середина соответствует его центру. Фактически же соответствующая центру референса временная позиция может быть определена по выражению

$$t_i^R = \frac{t_i^{\min} + t_i^{\max}}{2} - \tau_{\text{И}}. \quad (8)$$

Таким образом, по выражению (8) могут быть охарактеризованы временные позиции бинарных референсов для решения задачи определения распределения относительной диэлектрической проницаемости по длине. Этот метод может являться более простой и надежной альтернативой стандартным методам определения временных позиций.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПАССИВНОЙ РЕФЕРЕНСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Выполнена экспериментальная апробация метода пассивной референсной рефлектометрии. На рис. 4 представлены изготовленные версии центральных стержней измерительной коаксиальной линии.

На рис. 5 представлены рефлектограммы измерительных зондов, полученные экспериментально.

Выполнено измерение распределения относительной диэлектрической проницаемости по откликам от референсов измерительного зонда на основе модельных и экспериментальных данных. Для определения временных координат референсов были рассмотрены два варианта: 1) стандартным способом по позиции переднего фронта отклика от начала референса; 2) с использованием экстремумов по выражению (8). В табл. 3, 4 показаны восстановленные значения диэлектрической проницаемости для сегментов измерительной линии. Используемый шаг дискретизации по времени составляет 10 пс.

Таблица 3. Результаты определения распределения ϵ_r по длине измерительного тракта на основе локализации переднего фронта

Сегмент длины, мм	Фактиче- ская ве- личина ϵ_r	Полученная величина ϵ_r Модель	Погрешность $\delta\epsilon_r$, %	Полученная величина ϵ_r Эксперимент	Погрешность $\delta\epsilon_r$, % Эксперимент
0–99	1	0.99	1.5	0.99	<1
100–184		1.01	1.2	1.01	<1
185–269		1.01	1.2	1.05	5.2
270–354		1.01	1.2	0.98	1.5
355–439		0.98	2.3	1.15	14.9
440–519		0.98	2.3	1.18	17.8

Таблица 4. Результаты определения распределения ϵ_r по длине измерительного тракта на основе локализации экстремумов

Сегмент длины, мм	Фактиче- ская ве- личина ϵ_r	Полученная величина ϵ_r Модель	Погрешность $\delta\epsilon_r$, %	Полученная величина ϵ_r Эксперимент	Погрешность $\delta\epsilon_r$, % Эксперимент
0–99	1	1	<1	1.02	1.8
100–184		1.01	1.2	0.97	3.4
185–269		1.01	1.2	1.09	9
270–354		1.01	1.2	1.06	5.6
355–439		1.01	1.2	1.15	14.6
440–519		0.99	1.2	0.96	3.8

Для модельных данных оба способа определения временных координат имеют погрешность менее 2%, обусловленную в большей степени высоким шагом дискретизации. Для экспериментальных данных способ на основе определения положений экстремумов также показал схожие результаты по точности измерения относительной диэлектрической проницаемости. Однако ближе к концу измерительной линии погрешность сильно возрастает, что является результатом сложности интерпретации положений начала откликов по причине наложения переотраженных сигналов в связи с увеличением их длительности от начала к концу измерительной линии. Сред-

неквадратические отклонения от исходной величины относительной диэлектрической проницаемости составили $S_1 = 0.097$ и $S_2 = 0.083$, предельные отклонения равны 17.8% и 14.6% соответственно.

Подобная оценка была выполнена при погружении измерительного зонда в техническое масло, дистиллированную воду, а также при погружении в двухслойную среду из этих жидкостей. На рис. 6 представлена схема экспериментальной установки, состоящей из стробоскопического осциллографа Tektronix DSA8300 80E04 – *PSI*, генератора *GI* с длительностью импульсов по уровню 0.5, равной 253 пс, делителя мощности *WE1* и емкости с двухслойной средой при толщине слоя технического масла $h_1 = 85$ мм и толщине слоя дистиллированной воды $h_2 = 215$ мм, в табл. 5 представлены результаты измерения. Используемая в модели относительная диэлектрическая проницаемость технического масла, согласно проведенному предварительному экспериментальному исследованию с зондом без референсов, имеет значение $\epsilon_M = 2.1 \pm 0.2$, воды – $\epsilon_B = 81 \pm 2$.

Таблица 5. Результаты определения распределения ϵ_r по длине многослойной среды на основе локализации экстремумов

Сегмент длины, мм	Фактиче- ская ве- личина ϵ_r	Полученная величина ϵ_r Модель	Погрешность $\delta\epsilon_r$, %	Полученная величина ϵ_r Эксперимент	Погрешность $\delta\epsilon_r$, % Эксперимент
0–99	1	1	<1	1.02	1.8
100–184		1.01	1.2	0.97	3.4
185–219		0.95	4.9	1.35	34.7
220–269	2.1	2.27	8.24	2.24	6.67
270–304		2.22	5.62	2.34	13.3
305–354	81	81.81	3.02	77.85	3.9
355–439		79.42	0.59	74.67	7.82
440–519		79.15	1.66	63.85	21.17

Как и в эксперименте с измерительным зондом без погружения в жидкость, способ на основе определения положений экстремумов показал схожие, а в ряде случаев лучшие результаты по точности определения относительной диэлектрической проницаемости. В результате экспериментального исследования среднеквадратическое отклонение от исходной величины для однослойной среды технического масла составило $S_M = 0.36$, для дистиллированной воды – $S_B = 14.26$.

Согласно табл. 5, оценка многослойных сред также возможна, однако возникают трудности определения положений откликов от референсов в связи с их наложением на отклики от границ раздела сред. Например, в связи с этим на границе раздела воздух–техническое масло полученное значение относительной погрешности ε_r составило 34.7%. Дисперсия и значительные потери дистиллированной воды приводят к сильному затуханию и расширению длительности сигнала, в связи с чем локализация откликов в части случаев, в особенности от конца измерительной линии, затруднена для автоматического анализа. Тем не менее погрешность определения ε_r лишь в части случаев превышает 10%, что вполне может быть исправлено модернизацией измерительной системы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно проведенным модельному и экспериментальному исследованиям, способ пассивной референсной рефлектометрии применим для определения относительной диэлектрической проницаемости по длине тракта, в том числе при выполнении измерений многослойных сред. На основе полученных данных может быть определена или уточнена относительная диэлектрическая проницаемость слоев, что может быть полезно в задачах уровнеметрии для повышения точности определения уровней и получения сведений о качественных характеристиках слоев многослойных сред.

Предложенный вариант реализации на основе бинарных референсов позволяет повысить надежность идентификации откликов на фоне откликов от границ раздела и удобство оценки их локализации. Дальнейшее улучшение точности и идентификационных свойств способа может быть достигнуто, например, снижением длительности тестового сигнала за счет понижения наложений сигналов, что также приведет к снижению необходимой длины бинарных референсов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FEWM-2023-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nemarich C.P.* // IEEE instrumentation & measurement magazine. 2001. V. 4. № 4. P. 40.
<https://doi.org/10.1109/5289.975464>
2. *Harney W.J., Nemarich C. P.* // Proceed. OCEANS '83. 1983. P. 233.
<https://doi.org/10.1109/OCEANS.1983.1152003>
3. *Cataldo A., Tarricone L., Trotta A., Attivissimo F., Urso C.* // IEEE Instrumentation and measurement technology conference proceedings. 2005. V. 3. P. 1932.
<https://doi.org/10.1109/IMTC.2005.1604508>

4. *Cataldo A., Tarricone L., Trotta A., Attivissimo F.* // Measurement. 2008. V. 41. № 3. P. 307.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.11.006>
5. *Jones S.B., Wraith J.M., Or D.* // Hydrological processes. 2002. V. 16. № 1. P. 141.
<https://doi.org/10.1002/hyp.513>
6. Руководство по эксплуатации: уровнемер 5300.
https://www.testrite.com.ua/docs/emerson/rosemount-5300_expluatation_manual.pdf
7. *Gerding M., Musch T., Schiek B.* // Advances in Radio Science. 2002. V. 1. P. 27.
<https://doi.org/10.5194/ars-1-27-2003>
8. *Тренкаль Е.И.* Способ и устройства определения структуры и параметров многослойных сред на основе модифицированного TDR-метода. Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР 2019. 127 с.
9. *Корячко В.П., Румянцев С.С., Аронов Л.В.* // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 157.
<https://doi.org/10.21667/1995-4565-2023-84-157-165>.
10. *Фуско В.* СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. Москва: Радио и связь, 1990.
11. *Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р.* Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ. Москва: Связь, 1971.
12. *Giaquinto N., D'Aucelli G.M., Benedetto E., Cannazza G., Cataldo A.* // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. 2015. P. 187. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2015.7151263>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Фрагмент структуры с референсами.

Рис. 2. Рефлектограмма измерительного зонда с центральными стержнями различного исполнения, полученная в результате моделирования.

Рис. 3. Фрагмент рефлектограммы с демонстрацией ключевых временных позиций откликов: *1* – тестовый сигнал, *2* – отклик от бинарного референса, *3* – отклик от конца измерительной линии.

Рис. 4. Фотографии изготовленных центральных проводников измерительного зонда.

Рис. 5. Рефлектограмма измерительного зонда с центральными стержнями различного исполнения, полученная экспериментально.

Рис. 6. Фотография измеряемой многослойной среды.

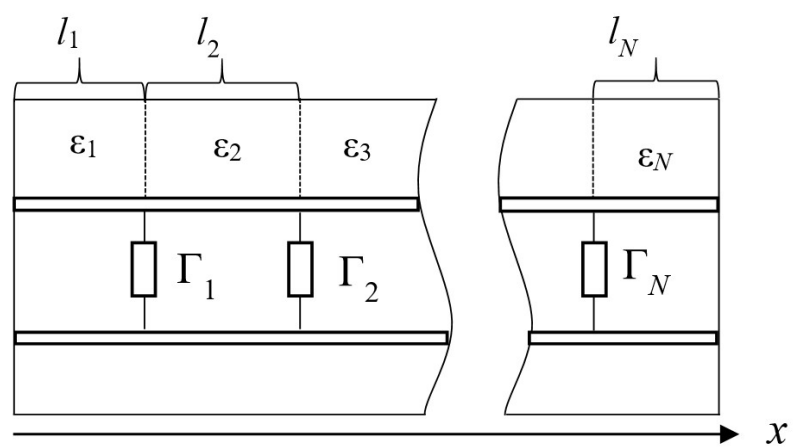


Рис. 1.

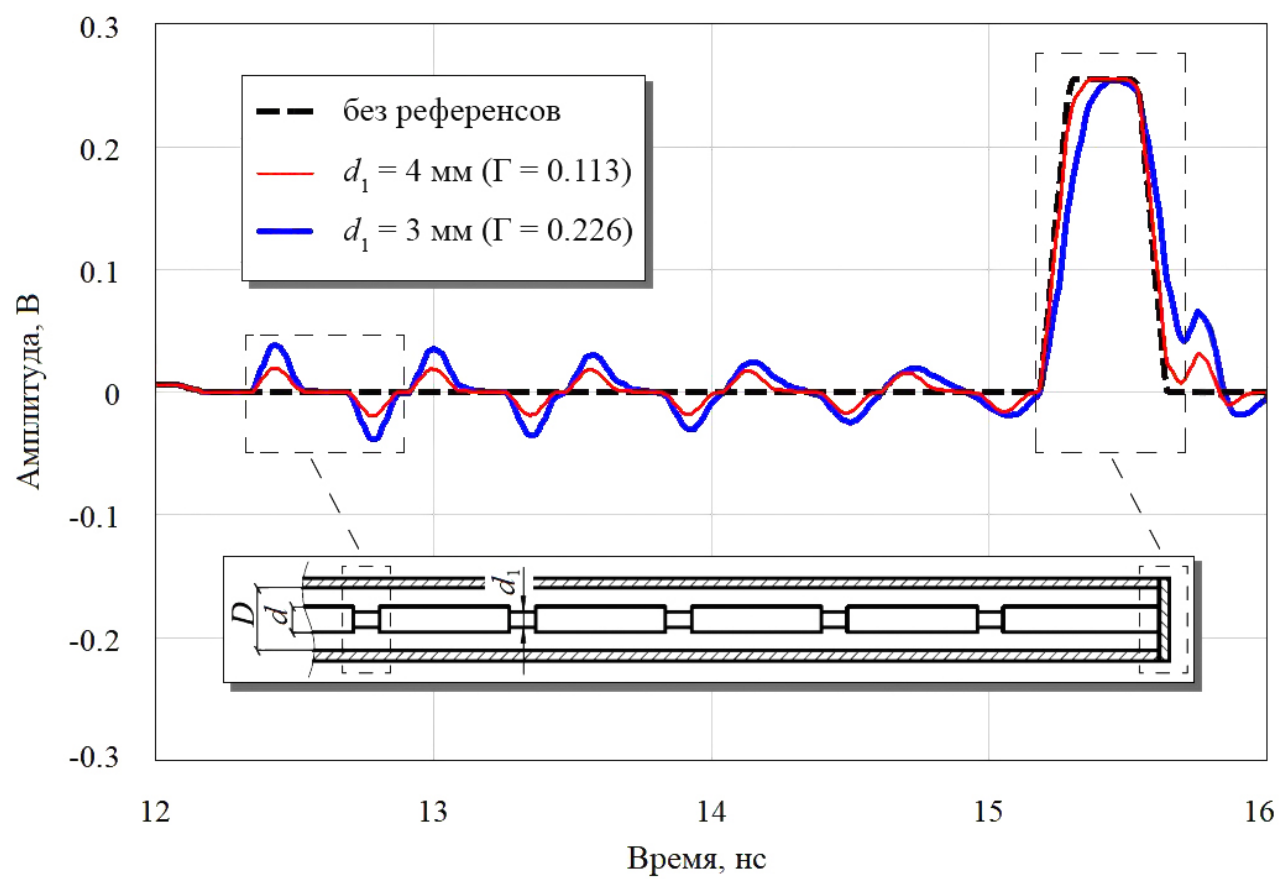


Рис. 2.

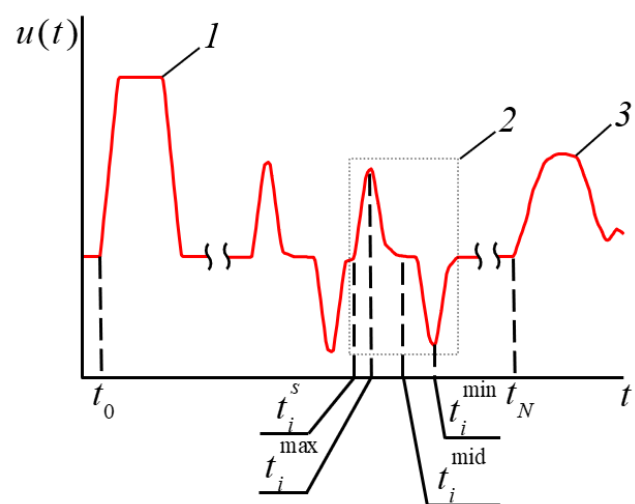


Рис. 3.

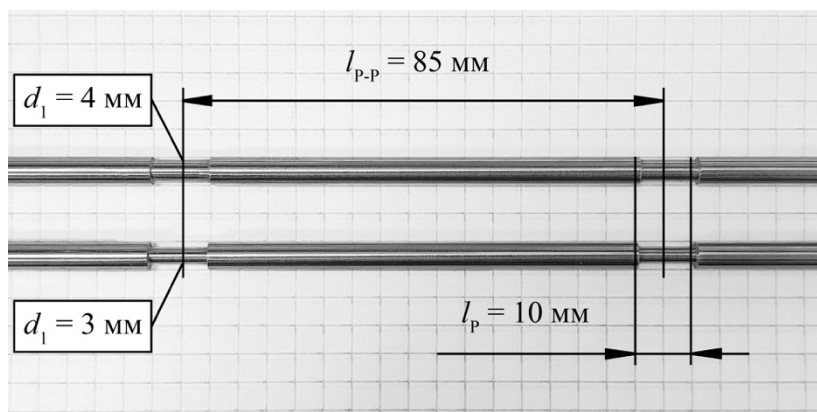


Рис. 4.

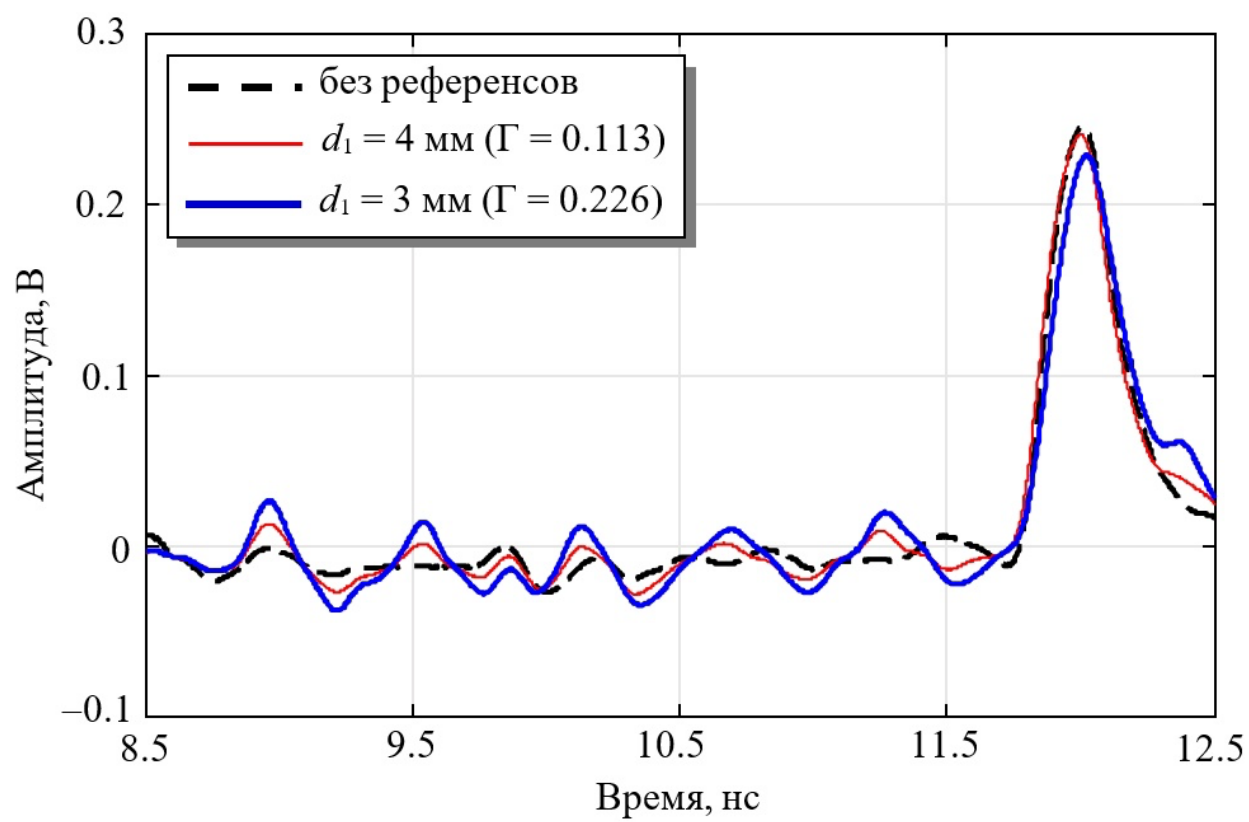


Рис. 5.

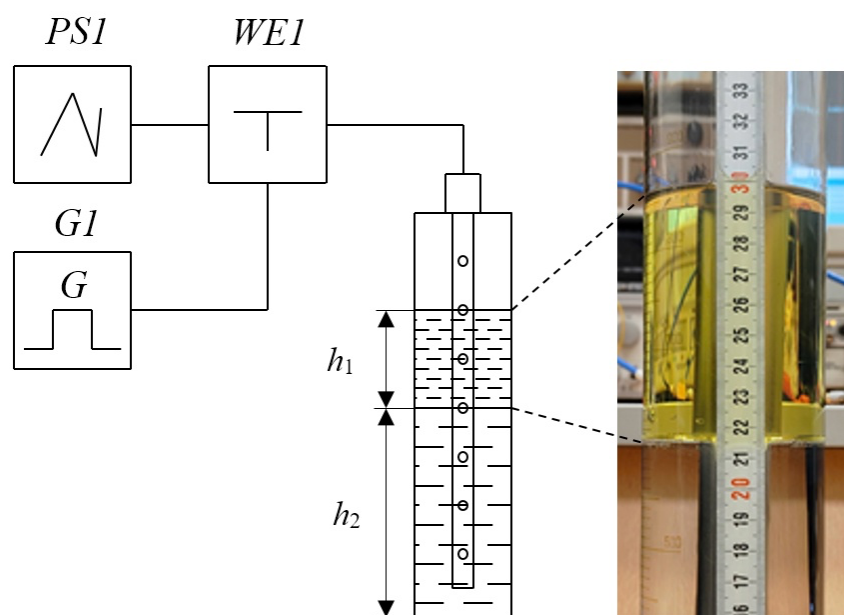


Рис. 6.