

УДК 681.586.621.37:543.275.1

# ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ДВУХ И ТРЕХ СРЕД В ЕМКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАДИОЧАСТОТНОГО МЕТОДА

**А.А. Маслов**

*Мурманский государственный технический университет*  
Россия, 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13  
[ptfaivt@mstu.edu.ru](mailto:ptfaivt@mstu.edu.ru)

**А.М. Прохоренков**

*Мурманский государственный технический университет*  
Россия, 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13  
[prohorenkovam@mstu.edu.ru](mailto:prohorenkovam@mstu.edu.ru)

**А.С. Совлуков**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [sovlas@ipu.ru](mailto:sovlas@ipu.ru)

**В.В. Яценко**

*Мурманский государственный технический университет*  
Россия, 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13  
[jacenkovv@rambler.ru](mailto:jacenkovv@rambler.ru)

**Ключевые слова:** измерение, радиочастотный, емкость, среда, граница раздела.

**Аннотация:** Рассматривается радиочастотный метод измерения положения границы раздела двух сред в емкости, а также двух границ раздела трех сред в емкости, в частности воздуха и двух несмешивающихся жидкостей. Метод реализуется с применением отрезка длинной линии и измерением временной характеристики распространения видеоимпульсов вдоль отрезка длинной линии и его резонансной частоты электромагнитных колебаний.

## 1. Введение

В различных отраслях промышленности необходимо с высокой точностью определять положение границы раздела двух сред, находящихся в какой-либо емкости одна над другой и образующих плоскую границу раздела, в частности двух несмешивающихся жидкостей с разной плотностью. Также на практике необходимо осуществлять высокоточное определение положения границ раздела различных многокомпонентных веществ в емкостях. В частности, часто требуется определять положение границ раздела трех сред, расположенных одна над другой и образующих две границы раздела: воздух – жидкость – жидкость, например, воздух–нефть (нефтепродукт) – вода.

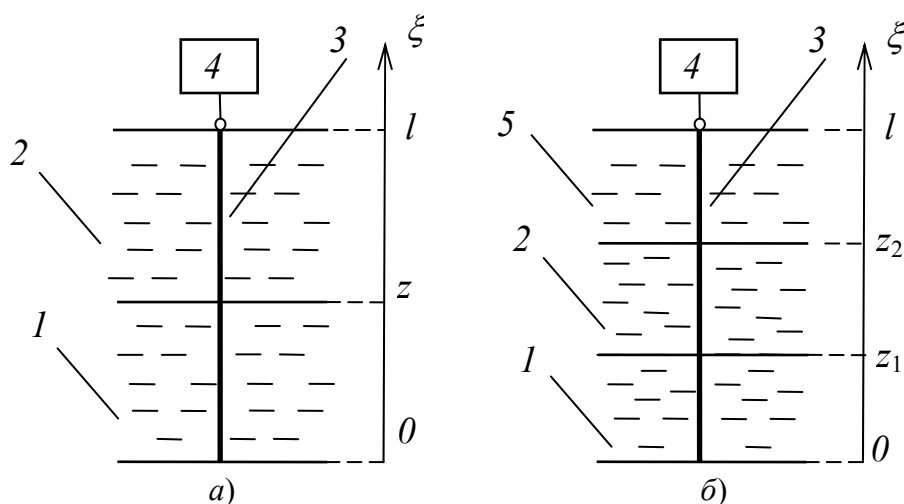
Для решения наиболее часто встречающейся на практике задачи для измерения положения границы раздела двух сред в емкостях находит успешное применение радиочастотный метод измерения, основанный на применении отрезков длинных линий (коаксиальной линии, двухпроводной линии и др.) в качестве чувствительных элементов [1-4]. Такой отрезок длинной линии размещается вертикально в емкости с контролируемыми средами, образующими в емкости границу раздела. Измеряя какой-либо его информативный параметр, в частности, резонансную частоту электромагнитных колебаний, можно определить положение границы раздела двух сред.

Рассмотрим применение данного подхода, базирующегося на применении отрезков длинной линии, к решению с повышенной точностью рассматриваемой здесь задачи измерения положения границ раздела сред, характеризуемой наличием как одной, так и двух границ раздела между средами, находящимися в какой-либо емкости одна над другой и образующих плоские границы раздела, в частности воздуха и двух несмешивающихся жидкостей с разной плотностью.

## 2. Измерение положения границы раздела двух сред

Предлагаемый метод измерения положения границы раздела двух сред обеспечивает достижение инвариантности к электрофизическим параметрам нижележащей среды при использовании двух разных информативных параметров отрезка длинной линии. В данном случае это – основная резонансная частота  $f$  отрезка длинной линии и суммарное время  $t$  прямого и обратного распространения электромагнитного импульсного сигнала в отрезке длинной линии до его нижнего конца. Именно возможные изменения электрофизических параметров нижележащей среды часто приводят к снижению точности измерения. Примерами являются среды, где нижележащая и вышележащая из них – соответственно, диэлектрическая жидкость и газ.

Сущность данного метода состоит в следующем. В емкости с контролируемыми средами 1 и 2, положение  $z$  границы раздела между которыми подлежит определению, располагают вертикально отрезок длинной линии 2 (рис. 1, а). По мере изменения  $z$  изменяются характеристики распространения электромагнитных волн в отрезке длинной линии и, как следствие, те или иные информативные параметры при использовании отрезка длинной линии в качестве чувствительного элемента.



**Рис. 1.** Функциональные схемы радиочастотных устройств для измерения положения границ раздела двух сред (а) и трех сред (б). 1, 2 и 5 – компоненты среды, 3 – отрезок длинной линии, 4 – электронный блок.

В качестве информативных параметров будем использовать резонансную частоту  $f$  отрезка длиной линии, рассматриваемого как резонатор, и суммарное время  $t$  прямого и обратного распространения электромагнитного импульсного сигнала в отрезке длиной линии до его нижнего конца.

Поскольку информативные параметры  $f$  и  $t$  являются функциями как положения  $z$  границы раздела двух сред, так и их электрофизических параметров, то, осуществляя совместные преобразования  $f$  и  $t$ , можно исключить влияние электрофизических параметров нижележащей среды на результаты измерений  $z$ .

Будем считать, что контролируемые среды являются диэлектриками. При измерении положения границ раздела сред, хотя бы одна из которых является несовершенным диэлектриком, следует использовать отрезки длиной линии, у которых, по меньшей мере, один из проводников покрыт диэлектрической оболочкой. Выбором конструктивных параметров (соотношения диаметров проводников и оболочки, а также материала оболочки), можно обеспечить достаточно большую величину ( $> 10$ ) добротности резонатора [1], обеспечить распространение импульсных сигналов.

Если отрезок длиной линии возбуждать на его резонансной частоте  $f$ , то зависимость этой частоты от  $z$  может быть выражена следующей формулой [1]:

$$(1) \quad \frac{f}{f_0} = [\varepsilon_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\varphi(z)]^{-1/2},$$

где  $f_0$  – начальное (при  $z = 0$ ) значение  $f$ ;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – величины относительных диэлектрических проницаемостей, соответственно, нижележащей и вышележащей сред.

В (1) функция

$$\varphi(z) = \int_0^z C_0(\xi)U^2(\xi)d\xi / \int_0^l C_0(\xi)U^2(\xi)d\xi,$$

где  $C_0(\xi)$  и  $U(\xi)$  – соответственно, погонная (т.е. на единицу длины) емкость отрезка длиной линии в точке с координатой  $\xi$ , и напряжение в этой точке;  $l$  – длина отрезка длиной линии; координаты  $z$  и  $\xi$  отсчитываются от нижнего конца отрезка длиной линии. Для отрезка однородной длиной линии будем полагать  $C_0(\xi) \equiv const$ , исходя из этого данная функция примет значение

$$\varphi(z) = \int_0^z U^2(\xi)d\xi / \int_0^l U^2(\xi)d\xi.$$

Если по рассматриваемому отрезку длиной линии осуществлять зондирование среды электромагнитными импульсными сигналами и принимать на его входе сигналы, прошедшие до нижнего конца отрезка длиной линии и отраженные от него, то функциональная связь суммарного времени  $t$  прямого и обратного распространения электромагнитных импульсных сигналов с положением  $z$  границы раздела двух сред в емкости может быть выражена так:

$$(2) \quad t = \frac{2z\sqrt{\varepsilon_1}}{c} + \frac{2(l-z)\sqrt{\varepsilon_2}}{c} = t_0 \left[ 1 + \left( \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} - 1 \right) \frac{z}{l} \right],$$

где  $c$  – скорость света,  $t_0 = 2l\sqrt{\varepsilon_2}/c$  – начальное время распространения импульсных сигналов в отрезке длиной линии (в отсутствие нижележащей среды в емкости).

Рассматривая (1) и (2) как систему уравнений относительно  $z$  и  $\varepsilon_1$ , можно получить выражение для определения  $z$ , в котором отсутствует зависимость от  $\varepsilon_1$ , т.е. которое позволяет получить информацию о положении  $z$  границы раздела двух сред в емкости независимо от электрофизических параметров нижележащей среды.

Соотношение (1) возможно упростить при условии  $\varphi(z) = z/l$  (в этом случае  $U(\xi) \equiv const$ ), соответствующем равномерному распределению электрической энергии поля вдоль отрезка длинной линии. Выполнение этого условия можно обеспечить, например, если отрезок длинной линии сделать разомкнутым на нижнем конце, а на входе отрезка длинной линии подключить индуктивность достаточно большой величины. При этом искомое выражение для определения  $z$  независимо от  $\varepsilon_1$ , получаемое при рассмотрении (1) и (2) как системы уравнений относительно  $z$  и ее решении, имеет следующий вид:

$$(3) \quad \frac{z}{l} = \frac{t/t_0 - 1}{\frac{f_0^2/f^2 - \varepsilon_2}{t/t_0 - 1} - 2}.$$

Рассмотрим схему для реализации данного метода. Возбуждение электромагнитных колебаний в отрезке длинной линии 3 (рис. 1, а), расположенном вертикально в емкости, можно производить с помощью электронного блока 4, в котором производятся необходимые действия: попеременное функционирование отрезка длинной линии как резонатора с измерением  $f$  (в первом режиме), обеспечение распространения в нем импульсных электромагнитных сигналов и измерение  $t$  (во втором режиме) и последующее совместное преобразование  $f$  и  $t$  согласно (3) для определения  $z$ . Связь электронного блока 4 с отрезком длинной линии 3 осуществляется через коммутатор. Результат совместного преобразования  $f$  и  $t$ , несущий информацию о величине  $z$  независимо от электрофизических характеристик нижележащей среды, поступает на индикатор.

### 3. Измерение положения границ раздела трех сред

Для осуществления радиочастотного метода определения положения границ раздела трех сред в емкости с применением одного отрезка длинной линии здесь используют также информативные параметры  $f$  и  $t$ . На рис. 1, б схематично изображена функциональная схема устройства для реализации данного метода. Здесь в емкости, содержащей три среды 1, 2 и 5, размещен вертикально отрезок длинной, в частности коаксиальной, длинной линии 3. К его верхнему концу подключен электронный блок 4, в котором производятся все необходимые операции: попеременное функционирование отрезка длинной линии как резонатора с измерением  $f$  (в первом режиме), обеспечение распространения в нем видеосигналов и измерения  $t$  (во втором режиме) и последующее совместное преобразование  $f$  и  $t$  согласно полученным соотношениям для определения координат  $z_1$  и  $z_2$  границ раздела трех сред.

Рассмотрим, как следует совместно преобразовать  $f$  и  $t$  в электронном блоке устройства, реализующего данный метод. Для этого будем считать, что содержащиеся в емкости среды 1, 2 и 5 являются диэлектрическими средами, характеризуемыми величинами относительных диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , соответственно, нижележащей, промежуточной и верхней сред (рис. 1, б). На рис. 1, б также изображены отрезок длинной линии 3 длиной  $l$  и координаты  $z_1$  и  $z_2$  границ раздела, считая от нижней (оконечной) нагрузки отрезка длинной линии; считается, что нижний конец отрезка длинной линии совмещен с дном емкости.

Тогда суммарное время  $t$  прямого и обратного распространения видеосигнала вдоль отрезка длинной линии является в этом случае следующим:

$$(4) \quad t = \frac{2z_1\sqrt{\varepsilon_1}}{c} + \frac{2(z_2 - z_1)\sqrt{\varepsilon_2}}{c} + \frac{2(l - z_2)\sqrt{\varepsilon_3}}{c} = t_{02} \left( \sqrt{\varepsilon_1} \frac{z_1}{l} + \sqrt{\varepsilon_2} \frac{z_2 - z_1}{l} + \sqrt{\varepsilon_3} \frac{l - z_2}{l} \right),$$

где  $t_{02} = 2l/c$  – начальное время распространения импульсных сигналов в отрезке длинной линии (в отсутствие всех сред в емкости).

Для резонансной частоты  $f$  отрезка однородной длинной линии имеем в данном случае следующее выражение (это вытекает, например, из [1] с учетом специфики рассматриваемой здесь задачи:

$$(5) \quad \frac{f}{f_0} = [\varepsilon_3 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)\varphi(z_1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)\varphi(z_1, z_2)]^{-1/2},$$

где  $f_0$  – начальное (при отсутствии в емкости всех трех сред) значение  $f$ ;

$$\varphi(z_1) = \int_0^{z_1} U^2(\xi) d\xi / \int_0^l U^2(\xi) d\xi; \quad \varphi(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} U^2(\xi) d\xi / \int_0^l U^2(\xi) d\xi.$$

Соотношения (4) и (5) будем рассматривать как систему уравнений относительно  $z_1$  и  $z_2$ . Величина  $U(\xi)$  в данных соотношениях зависит от конструктивных особенностей отрезка длинной линии, от нагрузочных элементов и может быть выбрана желательным образом. Для упрощения (5) можно сделать  $U(\xi) \equiv const$ , что соответствует равномерному распределению энергии электромагнитного поля вдоль отрезка длинной линии.

С учетом сказанного соотношение (5) принимает в этом случае следующий вид:

$$(6) \quad \frac{f}{f_0} = \left[ \varepsilon_3 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \frac{z_1}{l} + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) \frac{z_2 - z_1}{l} \right]^{-1/2}.$$

Рассматривая уравнения (4) и (6) как систему уравнений относительно  $z_1$  и  $z_2$  и решая ее, получим

$$(7) \quad \frac{z_1}{l} = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_3) \left( \frac{t}{t_0} - \sqrt{\varepsilon_3} \right) - (\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_3}) \left( \frac{f_0^2}{f^2} - \varepsilon_3 \right)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_3) (\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_3})},$$

$$(8) \quad \frac{z_2}{l} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \left( \frac{t}{t_0} - \sqrt{\varepsilon_3} \right) - (\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}) \left( \frac{f_0^2}{f^2} - \varepsilon_3 \right)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_3}) - (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) (\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2})}.$$

Таким образом, измерив величины  $f$  и  $t$  и преобразовав их согласно соотношениям (7) и (8), получим в явном виде информацию о координатах  $z_1$  и  $z_2$ . Поскольку, как показывает опыт, измерить  $f$  и  $t$  можно с высокой точностью, то также будем с высокой точностью получать информацию о координатах  $z_1$  и  $z_2$ .

## 4. Заключение

Данный метод позволяет с высокой точностью, независимо от электрофизических параметров нижележащей среды, определять положение границы раздела между двумя средами, а также обеих границ раздела между тремя средами в емкости. Реализация метода осуществима на базе одного отрезка длинной линии.

## Список литературы

1. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М.: Наука, 1978. 280 с.

2. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
3. Прохоренков А.М., Совлуков А.С., Терешин В.И., Яценко В.В. Радиочастотное устройство для индикации уровня и положения границы раздела веществ в емкостях // Датчики и системы. 2014. № 10. С. 41-45.
4. Маслов А.А., Прохоренков А.М., Совлуков А.С., Яценко В.В. Моделирование процесса измерения положения границы раздела двух сред в емкости с применением радиочастотного метода // Вестник Астраханского технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 4. С. 111-121.