

РАДИОЧАСТОТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД УРОВНЕМЕТРИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

А.С. Совлуков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
sovlas@ipu.ru

В.В. Яценко

Мурманский арктический университет
Россия, 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13
jacenkovv@rambler.ru

А.В. Кайченков

Мурманский арктический университет
Россия, 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13
kaychenovav@mstu.edu.ru

Ключевые слова: измерение, резервуар, жидкость, уровень, радиочастотный, диэлектрический.

Аннотация: Рассматривается радиочастотный метод измерения уровня диэлектрической жидкости в резервуаре. Метод реализуется с применением устройства, содержащего два располагаемых вертикально в резервуаре с контролируемой жидкостью отрезка коаксиальной длинной линии, нижние концы которых совмещены с дном резервуара. Измеряя их резонансные частоты электромагнитных колебаний, при совместном функциональном преобразовании этих резонансных частот определяют уровень жидкости при обеспечении инвариантности результата этого преобразования к величине диэлектрической проницаемости жидкости. Отрезки длинной линии подключены ко входу соответствующего электронного блока, выходы электронных блоков подсоединены к соответствующим входам функционального преобразователя. Его выход соединен с регистратором. Отрезки коаксиальной длинной линии выполнены в виде соосно расположенных внутреннего и двух полых цилиндрических проводников, при этом один отрезок коаксиальной длинной линии образован внутренним проводником и внутренней поверхностью среднего цилиндрического проводника, а другой – наружной поверхностью среднего цилиндрического проводника и внешним цилиндрическим проводником. Отрезки коаксиальной длинной линии содержат на их нижних концах соответствующие оконечные горизонтальные участки одинаковой длины, скачкообразно заполняемые жидкостью и опорожняемые при, соответственно, поступлении жидкости в резервуар и ее удалении из резервуара.

1. Введение

В различных отраслях промышленности необходимо с высокой точностью определять уровень диэлектрических жидкостей (нефтепродуктов, сжиженных газов и др.), находящихся в каких-либо резервуарах. Для решения наиболее часто встречающейся на практике задачи для измерения уровня жидкостей в резервуарах

находит успешное применение радиочастотный метод измерения, основанный на применении устройств на основе отрезков длинных линий (коаксиальной линии, двухпроводной линии и др.) в качестве чувствительных элементов [1, 2]. Такой отрезок длинной линии размещают вертикально в емкости с контролируемой жидкостью. Измеряя какой-либо его информативный параметр, в частности, резонансную частоту электромагнитных колебаний, можно определить уровень жидкости в резервуаре. Для обеспечения инвариантности результатов радиочастотных измерений уровня к электрофизическим свойствам контролируемой жидкости разработаны методы и устройства, основанные на реализации двухканальных схем измерения.

Информацию об уровне z диэлектрической жидкости независимо от величины ее диэлектрической проницаемости ε получают согласно методу измерения уровня диэлектрической среды, в соответствии с которым осуществляют совместное функциональное преобразование $A(z) = A(f_1, f_2)$ в электронном блоке устройства измеряемых резонансных частот f_1 и f_2 обоих отрезков длинной линии (в данном случае – рассматриваемых отрезков coaxиальной длинной линии) согласно соотношению

$$A(z) = A(f_1, f_2) = \frac{f_{10}^2/f_1^2 - 1}{f_{20}^2/f_2^2 - 1}, \text{ где } f_{10} \text{ и } f_{20} - \text{начальные (при } z = 0) \text{ значения резонансных}$$

частот f_1 и f_2 , соответственно [1-3]. Данное соотношение обладает свойством инвариантности к электрофизическим параметрам жидкости, в частности, к величине диэлектрической проницаемости ε и ее возможным изменениям. Недостаток этих методов и устройств – невысокая точность измерения уровня, главным образом, в области малых значений уровня, близких к нулевому значению. В этом случае при нулевом значении уровня ($z = 0$) имеется неопределенность типа “0/0”, а вблизи значения $z = 0$ погрешность измерения резко возрастает, поскольку результат приведенного выше преобразования $A(z) = A(f_1, f_2)$ может принимать разные значения из-за возможных, даже малых, девиаций значений f_1 и f_2 (данное преобразование f_1 и f_2 неустойчиво относительно возможных флуктуаций значений f_1/f_{10} и f_2/f_{20}).

В известном методе инвариантной уровнеметрии применяют два независимых отрезка длинной линии с оконечными горизонтальными участками разной длины, располагаемых вертикально и заполняемых диэлектрической жидкостью в соответствии с ее уровнем в резервуаре [4]. Измеряя резонансные частоты этих отрезков длинной линии и производя их совместное функциональное преобразование, можно определить значение уровня жидкости независимо от диэлектрической проницаемости жидкости. Недостатком этого метода измерения и устройств на его основе является возможность снижения точности измерения, что вызвано расположением двух отрезков длинной линии в разных областях резервуара с контролируемой жидкостью. В этих областях электрофизические параметры (диэлектрическая проницаемость, электропроводность) жидкости могут отличаться. Это может приводить к снижению точности измерения уровня жидкости, так как величина резонансной частоты зависит как от уровня жидкости, так и от ее электрофизических параметров.

2. Метод измерения

Рассмотрим возможные метод измерения и реализации на его основе инвариантных радиочастотных уровнемеров жидкостей, характеризуемые повышенной точностью измерения, достаточно простой реализацией и свободные от указанных выше недостатков радиочастотных методов и средств уровнеметрии.

На рис. 1 схематично изображена функциональная схема устройства для реализации рассматриваемого метода измерения. Здесь в резервуаре, содержащем контролируемую диэлектрическую жидкость 1, размещены вертикально два отрезка соосных отрезка коаксиальной длинной линии 2 и 3. Отрезок коаксиальной длинной линии 2 образован совокупностью внутреннего проводника 4 и внутренней поверхностью соосного с ним среднего цилиндрического проводника 5, а другой отрезок коаксиальной длинной линии 3 – совокупностью наружной поверхности среднего цилиндрического проводника 5 и внешнего цилиндрического проводника 6. Отрезки коаксиальной длинной линии 2 и 3 имеют на их соответствующих нижних концах окончательные горизонтальные участки 7 и 8 фиксированной одинаковой длины z_0 .

С помощью проводников линии связи 9 отрезок коаксиальной длинной линии 3 подсоединен к электронному блоку 11, а с помощью проводников линии связи 10 отрезок коаксиальной длинной линии 2 подсоединен к электронному блоку 12. С помощью электронных блоков 12 и 11 в отрезках коаксиальной длинной линии 2 и 3 производят возбуждение электромагнитных колебаний и измерение резонансных частот f_1 и f_2 , соответственно. Выходы электронных блоков 12 и 11, с которых поступают значения резонансных частот f_1 и f_2 , подключены к входу функционального преобразователя 13. К его выходу подключен регистратор 14, где фиксируется результат совместного преобразования f_1 и f_2 , несущий информацию об уровне диэлектрической жидкости 1 в резервуаре и получаемый в функциональном преобразователе 13.

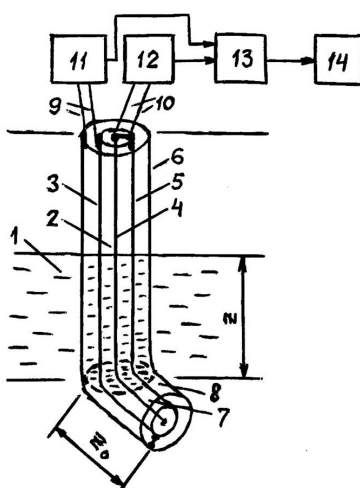


Рис. 1. Функциональная схема радиочастотного устройства для измерения уровня жидкости: 1 – жидкость, 2 и 3 – отрезки коаксиальной длинной линии, 4 – внутренний проводник, 5 – средний цилиндрический проводник, 6 – внешний цилиндрический проводник, 7 и 8 – горизонтальные участки, 9 и 10 – линии связи, 11 и 12 – электронные блоки, 13 – функциональный преобразователь, 14 – регистратор.

Отрезок коаксиальной длинной линии 2 и отрезок коаксиальной длинной линии 3 имеют на их нижних концах окончательные горизонтальные участки 7 и 8, соответственно, фиксированной одинаковой длины z_0 . Эти оба отрезка длинной линии, размещаемые в емкости с контролируемой жидкостью 1 вертикально, заполняются жидкостью в соответствии с ее уровнем в емкости. При этом горизонтальные участки отрезков длинной линии скачкообразно заполняются жидкостью и опорожняются при, соответственно, поступлении жидкости в резервуар и ее удалении из резервуара.

Оконечными нагрузками данных отрезков коаксиальной длинной линии 2 и 3 могут быть такие реактивные сопротивления, при наличии которых вдоль этих отрезков длинной линии имеет место разное распределение энергии электромагнитного

поля стоячих волн. При этом возможно однозначное получение информации об уровне z диэлектрической жидкости независимо от ее диэлектрической проницаемости ε при совместном преобразовании $A(z) = A(f_1, f_2)$ в функциональном преобразователе 13 резонансных частот $f_1(z, \varepsilon)$ и $f_2(z, \varepsilon)$ отрезков коаксиальной длинной линии 2 и 3 согласно соотношению

$$(1) \quad A(z) = A(f_1, f_2) = \frac{f_{10}^2 / f_1^2 - 1}{f_{20}^2 / f_2^2 - 1},$$

где f_{10} и f_{20} – начальные (при $z = 0$) значения резонансных частот $f_1(z, \varepsilon)$ и $f_2(z, \varepsilon)$, соответственно.

Отрезок коаксиальной длинной линии 2 и 3 могут иметь реактивные сопротивления их верхних и нижних концах, обеспечивая разное распределение электрического и магнитного полей стоячих волн вдоль них. В частности, как показано на рис. 1, отрезок длинной линии 2 может быть выполнен короткозамкнутым на его верхнем конце и разомкнутым на его нижнем конце, а именно, на конце его горизонтального участка 7; отрезок длинной линии 3 может быть выполнен короткозамкнутым на его нижнем конце, а именно, на конце его горизонтального участка 8, и разомкнутым на его верхнем конце. При этом оба отрезка длинной линии 2 и 3 являются четвертьволновыми резонаторами (длина каждого из этих резонаторов равна четверти длины возбуждаемых в резонаторах электромагнитных колебаний низшего типа *TEM*). В отрезке длинной линии 2 максимум и минимум напряженности электрического поля (и, соответственно, минимум и максимум магнитного поля) стоячей электромагнитной волны расположены, соответственно, у нижнего конца этого отрезка длинной линии (конца его горизонтального участка 7) и у его верхнего конца. В отрезке длинной линии 3 максимум и минимум напряженности электрического поля (и, соответственно, минимум и максимум магнитного поля) стоячей электромагнитной волны расположены, соответственно, у верхнего конца этого отрезка длинной линии и у его нижнего конца (конца его горизонтального участка 8).

При этом, за счет наличия горизонтальных участков у отрезков длинной линии 2 и 3, при соответствующей, присущей данному методу, совместном функциональном преобразовании резонансных частот f_1 и f_2 двух отрезков длинной линии, устраняется неопределенность результатов измерения уровня z жидкости при его нулевом и близких к нему значениях.

Отрезки длинной линии 2 и 3 являются высокочастотными резонаторами с электромагнитными колебаниями основного типа *TEM*. Резонансные частоты f_1 и f_2 соответствующих резонаторов служат информативными параметрами (зависимости f_1 и f_2 от уровня z жидкости в резервуаре) соответствующего измерительного канала. Обычно f_1 и f_2 находятся в диапазоне частот $\sim 1 \div 100$ МГц при изменении уровня z от его нулевого значения до уровня, соответствующего полному заполнению резервуара.

Возбуждение и съём колебаний в отрезках длинной линии 2 и 3 можно осуществлять в их верхних частях так: для отрезка длинной линии 2, имеющего максимум напряженности магнитного поля стоячей волны у верхнего конца, можно производить связь по магнитному полю с помощью индуктивных элементов связи (петель); для отрезка длинной линии 3, имеющего максимум напряженности электрического поля стоячей волны у его верхнего конца, можно производить с помощью емкостных элементов связи (конденсаторов с емкостью $\sim 1 \div 10$ пФ).

Совместное функциональное преобразование измеряемых резонансных частот f_1 и f_2 отрезков длинной линии 2 и 3, соответственно, в функциональном преобразователе 13 согласно вышеприведенному соотношению $A(f_1, f_2)$ позволяет с высокой точностью определить уровень z во всем диапазоне его изменения независимо от значения диэлектрической проницаемости ε жидкости.

Для отрезков длинной линии, длина вертикальной части каждого из которых имеет длину l и на конце удлинение в виде горизонтального участка фиксированной длины z_0 , возбуждаемых на, соответственно, резонансных частотах f_1 и f_2 , зависимость этих резонансных частот от уровня z можно выразить следующими соотношениями:

$$(2) \quad f_1/f_{1_0} = [1 + (\varepsilon - 1)\varphi_1(z, z_0)]^{-1/2},$$

$$(3) \quad f_2/f_{2_0} = [1 + (\varepsilon - 1)\varphi_2(z, z_0)]^{-1/2},$$

где f_{1_0}, f_{2_0} – начальные (при отсутствии в емкости жидкости) значения f_1 и f_2 , соответственно;

$$\varphi_1(z, z_0) = \int_{-z_0}^z U_1^2(\xi) d\xi / \int_{-z_0}^l U_1^2(\xi) d\xi; \quad \varphi_2(z, z_0) = \int_{-z_0}^z U_2^2(\xi) d\xi / \int_{-z_0}^l U_2^2(\xi) d\xi;$$

$U_1(\xi)$ и $U_2(\xi)$ – напряжение в точке с координатой ξ соответствующего отрезка длинной линии, возбуждаемого на резонансной частоте f_1 и f_2 , соответственно; координата ξ отсчитывается от нижнего конца вертикальной части каждого отрезка длинной линии, т.е. от значения $z = 0$.

Соотношения (2) и (3) позволяют путем их совместного преобразования

$$(4) \quad A(z) = \frac{(f_{1_0}/f_1)^2 - 1}{(f_{2_0}/f_2)^2 - 1} = \frac{\varphi_1(z, z_0)}{\varphi_2(z, z_0)},$$

определить значение уровня z жидкости в резервуаре независимо от значения ее диэлектрической проницаемости ε . Это соотношение является инвариантным по отношению к ε . В любой малой окрестности значения $z = 0$ функция $A(z)$ имеет, за счет наличия горизонтальных участков у отрезков длинной линии 2 и 3, конечное значение. Это подтверждает, что обеспечивается высокая точность измерения при любых значениях координаты z , включая его малые, вблизи нуля, значения.

3. Заключение

Данные радиочастотный резонансный метод уровнеметрии и двухканальное устройство для его осуществления позволяют измерять уровень различных диэлектрических жидкостей в резервуарах с высокой точностью, независимо от значений диэлектрической проницаемости жидкостей.

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. Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука, 1976. 244 с.
4. Совлуков А.С. Радиочастотная уровнеметрия жидкостей в емкостях с применением тестового метода повышения точности измерений // Датчики и системы. 2017 № 1. С. 67-72.