

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ И ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

И.В. Плотникова, А.Б. Степанов, Р.И. Якшигильдина

Описывается метод измерения относительных диэлектрических проницаемостей каждого из слоев двухслойной жидкости и определения положения границы раздела между слоями, который основан на применении трех ёмкостных датчиков уровня. Приводятся результаты математического моделирования предлагаемого метода измерения.

Ключевые слова: ёмкость измерительного преобразователя, двухслойная жидкость, относительная диэлектрическая проницаемость, граница раздела, погрешность измерения, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Для различных областей современной науки и техники характерно большое многообразие измерительных задач, связанных с необходимостью проведения измерений уровня разнообразных жидких сред [1]. Так, например необходимость измерения уровня возникает в большинстве интеллектуальных систем экологического мониторинга и безопасности, в современных производственных процессах, а также при контроле массы и расхода жидких сред на этапе их транспортировки или в процессе хранения. В настоящее время существуют более двадцати различных способов измерения уровня жидких сред [1-4]. Часть из них получили широкое применение в современной промышленности, а другие имеют узкоспециальную область применения из-за присущих им различных недостатков [2, 3]. Как правило, в большинстве практических приложениях требуется не только измерять не только уровень жидкой среды [4, 5], но и положение границы раздела между слоями [3, 6-8], если жидкая среда является многокомпонентной. Примером такой многокомпонентной жидкой среды может, например, служить нефть/подтоварная вода в отстойных резервуарах. Следует отметить, что большинство современных практических подходов для измерения границы раздела двухслойной жидкости оказываются непригодными. Так, например ряд методов измерений могут работать только в том случае, если контролируемая жидкая среда является прозрачной [3]. Поэтому возникает задача рассмотрения иных технических решений к измерению уровня и границы раздела двух-

слойной жидкой среды. В настоящее время наиболее широкое применение для измерения уровня жидких сред получили ёмкостные датчики измерения уровня [3, 6, 9]. В основу принципа действия ёмкостного уровнемера положена зависимость значения электрической ёмкости измерительного преобразователя в виде конденсатора образованного, например, при помощи двух пластин, которые частично введены в измеряемую среду от высоты уровня жидкости. В данной статье рассматривается метод измерения, который основан на применении трех ёмкостных датчиков уровня.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассматриваемый метод измерения относительных диэлектрических проницаемостей и положения границы раздела между слоями жидкой среды описывает измерительную систему, состоящий из трех ёмкостных измерительных преобразователей в виде плоских конденсаторов. Следует заметить, что электрический конденсатор представляет собой систему, состоящую из двух проводников, которые разделены слоем диэлектрика. Значение электрической ёмкости конденсатора C для случая плоскопараллельного расположения измерительных электродов можно определить с помощью следующего математического выражения (при пренебрежении краевым эффектом) [3]:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}, \quad (1)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость межэлектродной среды; ε_0 - диэлектрическая постоянная; S - площадь измерительных электродов конденсатора; d - рас-

стояние между измерительными электродами конденсатора.

Возможное взаимное расположение и геометрические размеры измерительных электродов трех ёмкостных датчиков D1 – D3 показаны на рисунке 1. Будем считать, что расстояние между измерительными электродами датчиков равно d , а ширина и высота измерительного электродов ёмкостных датчиков уровня равны соответственно a и b (рисунок 1).

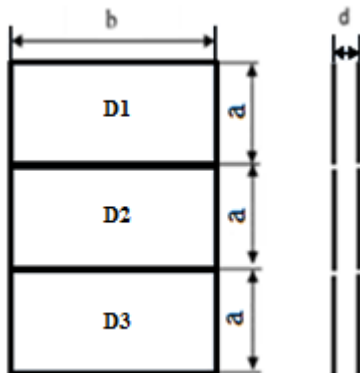


Рисунок 1 – Расположение и размеры ёмкостных датчиков уровня

Рассмотрим резервуар с двухслойной жидкой средой. При этом будем считать, что двухслойная жидкость занимает полностью весь объём резервуара (рисунок 2). Относительная диэлектрическая проницаемость верхнего слоя жидкой среды равна ε_1 , а относительная диэлектрическая проницаемость нижнего слоя жидкой среды равна ε_2 (рисунок 2).

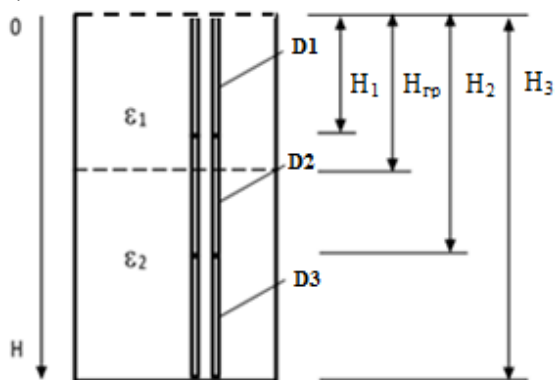


Рисунок 2 – Резервуар с тремя ёмкостными датчиками уровня

В этом случае задача измерения положения границы раздела жидких сред сводится к применению трех ёмкостных датчиков уровня. Предположим, что граница раздела двух жидких сред проходит через измерительные электроды датчика D2 (рисунок 2).

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 Т.2 2016

Будем считать, что начало координат находится в верхней граничной плоскости резервуара. При этом будем считать, что датчик D1 погружен в контролируемую двухслойную жидкую среду на уровень H_1 , датчик D2 на уровень H_2 , а датчик D3 на уровень H_3 , а граница раздела двух жидких сред находится на уровне $H_{гр}$ (рисунок 2).

По выражению (1) найдем значение ёмкости для каждого из трёх датчиков уровня.

Значение ёмкости датчика D1 запишем в виде:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot b \cdot H_1}{d} \quad (2)$$

Значение ёмкости датчика D2 запишем в виде:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot b \cdot (H_{гр} - H_1)}{d} + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot b \cdot (H_2 - H_{гр})}{d} \quad (3)$$

Значение ёмкости датчика D3 запишем в виде:

$$C_3 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot b \cdot (H_3 - H_2)}{d} \quad (4)$$

Из выражений (2) и (4) запишем значения относительных диэлектрических проницаемостей ε_1 и ε_2 :

$$\varepsilon_1 = \frac{d \cdot C_1}{\varepsilon_0 \cdot b \cdot H_1} \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{d \cdot C_3}{\varepsilon_0 \cdot b \cdot (H_3 - H_2)} \quad (6)$$

Будем считать, что

$$H_3 = 3 \cdot H_1, \quad H_2 = 2 \cdot H_1.$$

Подставив полученные выражения для ε_1 и ε_2 в выражение (3), получаем выражение для значения уровня границы раздела двух жидких сред:

$$H_{гр} = H_1 \cdot \frac{C_2 - 2 \cdot C_3 + C_1}{C_1 - C_3} \quad (7)$$

Таким образом, в любой момент времени известны значения относительных диэлектрических проницаемостей обоих слоев жидкой среды и уровень границы раздела между слоями двухслойной жидкости.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Предположим, что в системе, которая изображена на рисунке 2, измерение значения ёмкости происходит с погрешностью ξ_{C_i} , то есть

$$C_1 = C_{1н} + \xi_{C_1}, \quad C_2 = C_{2н} + \xi_{C_2},$$

$$C_3 = C_{3н} + \xi_{C_3},$$

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ И ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

где $C_{1н}$, $C_{2н}$ и $C_{3н}$ – истинные значения ёмкости датчиков уровня, а ξ_{C_1} , ξ_{C_2} и ξ_{C_3} – полные погрешности измерения соответствующих ёмкостей.

Определим погрешности измерения относительных диэлектрических проницаемостей ε_1 , ε_2 и положения границы разделов $H_{гр}$ через погрешности измерения ёмкостных датчиков уровня ξ_{C_1} , ξ_{C_2} и ξ_{C_3} .

При линейной зависимости относительной диэлектрической проницаемости от измеряемой ёмкости согласно [10] среднее квадратическое отклонение результата косвенного измерения определяется следующим образом:

$$\sigma_{\varepsilon_1} = \frac{d}{\varepsilon_0 \cdot b \cdot H_1} \cdot \sigma_{C_1}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\varepsilon_2} = \frac{d}{\varepsilon_0 \cdot b \cdot (H_3 - H_2)} \sigma_{C_3}, \quad (9)$$

где σ_{C_1} и σ_{C_3} среднеквадратические отклонения ёмкостных датчиков D1 и D3.

При нелинейной зависимости положения границы раздела $H_{гр}$ от измеряемых значений параметров согласно [10] среднее квадратическое отклонение результата косвенного измерения определяется следующим образом:

$$\sigma_{H_{гр}} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_{гр}}{\partial C_1}\right)^2 (\sigma_{C_1})^2 + \left(\frac{\partial H_{гр}}{\partial C_2}\right)^2 (\sigma_{C_2})^2 + \left(\frac{\partial H_{гр}}{\partial C_3}\right)^2 (\sigma_{C_3})^2}. \quad (10)$$

При этом

$$\frac{\partial H_{гр}}{\partial C_1} = \frac{H_1(C_2 - C_3)}{(C_1 - C_3)^2}, \quad \frac{\partial H_{гр}}{\partial C_2} = \frac{H_1}{C_1 - C_3}, \quad \frac{\partial H_{гр}}{\partial C_3} = \frac{H_1(C_1 - C_2)}{(C_1 - C_3)^2}.$$

Тогда

$$\sigma_{H_{гр}} = \sqrt{\left(\frac{H_1(C_2 - C_3)}{(C_1 - C_3)^2}\right)^2 (\sigma_{C_1})^2 + \left(\frac{H_1}{C_1 - C_3}\right)^2 (\sigma_{C_2})^2 + \left(\frac{H_1(C_1 - C_2)}{(C_1 - C_3)^2}\right)^2 (\sigma_{C_3})^2}. \quad (11)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МЕТОДА С ТРЕМЯ ЁМКОСТНЫМИ ДАТЧИКАМИ УРОВНЯ

Рассмотренный метод измерения относительных диэлектрических проницаемостей

и положения границы раздела между двумя слоями жидкой среды был смоделирован в пакете MathCad со следующими начальными условиями:

- высота резервуара 0,6 м;
 - высота измерительных электродов ёмкостных датчиков уровня 0,2 м;
 - ширина измерительных электродов ёмкостных датчиков уровня 0,3 м;
 - расстояние между измерительными электродами ёмкостных датчиков уровня 0,01 м;
 - относительная диэлектрическая проницаемость первого слоя жидкой среды 2,2;
 - относительная диэлектрическая проницаемость второго слоя жидкой среды 81;
 - время моделирования 1000 с.
- Положение границы раздела слоев жидкости задавалось следующим выражением:

$$H_{гр} = 0,2 + 0,1 \cdot (\sin(0,003 \cdot t) + 0,2 \cdot \cos(0,004 \cdot t)),$$

где t – время, с.

На рисунке 3 представлен график зависимости положения границы раздела от времени.

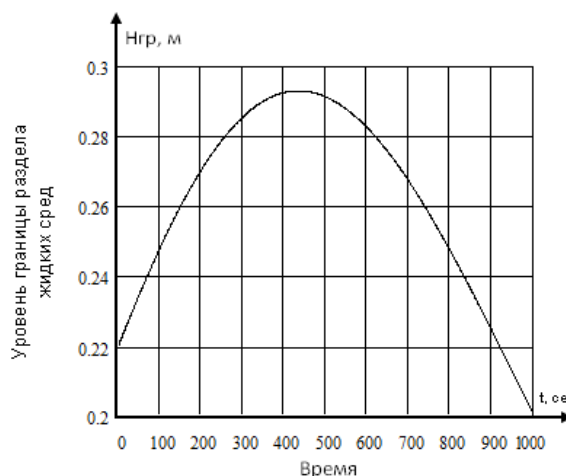


Рисунок 3 – Положение границы раздела между слоями жидкой среды

Также предполагалось, что погрешности измерения ёмкостных датчиков уровня представляют собой белый шум с амплитудой 1% от предельного значения показания датчиков.

В процессе моделирования на каждой секунде формировалась выборка из 10 измерений значений ёмкостей для каждого из трех датчиков уровня. Затем по полученной выборке определялись математические ожидания и среднеквадратические отклонения для значений ёмкостей датчиков уровня. Кроме

того, по каждому измерению выборки вычислялись относительные диэлектрические проницаемости слоев жидкости, и положение границы раздела между слоями, для которых затем также определялись математические ожидания и среднеквадратические отклонения.

На рисунках 4 – 5 представлены графики с результатами математического моделирования.

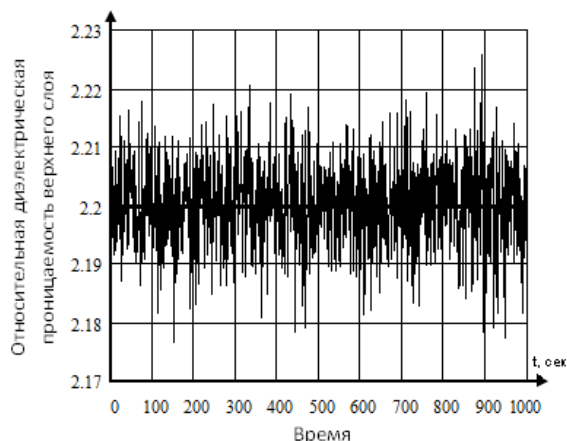


Рисунок 4 – Относительная диэлектрическая проницаемость верхнего слоя

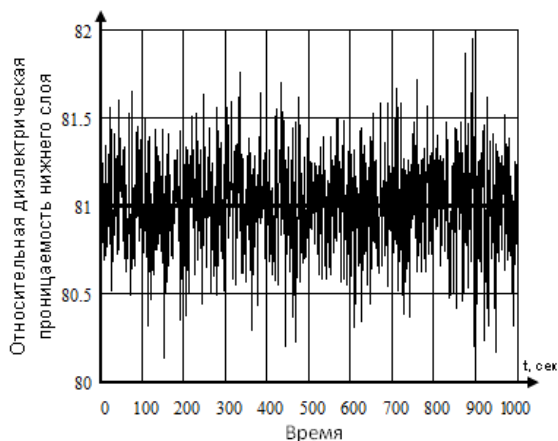


Рисунок 5 – Относительная диэлектрическая проницаемость нижнего слоя

В результате математического моделирования получили, что для ёмкостного датчика D1 предельное значение ёмкости составляет 11,68 пФ, а для ёмкостного датчика D3 – 430,1 пФ. Тогда значение амплитуды белого шума для датчика D1 составит $3\sigma_{C_1} = 0,12$ пФ, а значение амплитуды белого шума для датчика D3 составит $3\sigma_{C_3} = 4,30$ пФ. Подставив эти найденные значения в выражения (8) и (9), получим:

$$\sigma_{\varepsilon_1} = \frac{0,01}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,3 \cdot 0,2} \cdot 0,12 \cdot 10^{-12} = 2,26 \cdot 10^{-3},$$

$$\sigma_{\varepsilon_2} = \frac{0,01}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,3 \cdot 0,2} \cdot 4,3 \cdot 10^{-12} = 0,081.$$

Так как в выражение (11) входит текущее значение ёмкости датчика D2, то для определения теоретического значения $\sigma_{H_{гр}}$ вычислим его для момента времени $t = 1000$ с.

В этот момент времени $C1 = 11,69$ пФ, $C2 = 428,3$ пФ, $C3 = 430,5$ пФ, $H_{гр} = 0,20$ м, а среднеквадратическое отклонение для положения границы раздела $H_{гр}$ составит $\sigma_{H_{гр}} = 6,35 \cdot 10^{-4}$ м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен метод измерения относительных диэлектрических проницаемостей слоев и положения границы раздела двухслойной жидкой среды, основанный на применении трех ёмкостных датчиков уровня. Приведены результаты математического моделирования и выполнена оценка погрешностей измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровников Г.Н. Методы измерения уровня/ Г.Н. Бобровников, А. Г. Катков. – М.: Машиностроение, 1977. – 168 с.
2. Ершов М.Н. Методы измерения уровня жидких продуктов: теория и практика/ М.Н. Ершов// Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – № 4-1. – С. 46-57. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/metody-izmereniya-urovnya-zhidkih-produktov-teoriya-i-praktika> (дата обращения: 1.11.2016).
3. Винокуров Б.Б. Современная уровнеметрия жидких сред: учебное пособие/ Б.Б. Винокуров. – Томск: ТПУ, 2014. – 188 с.
4. Жданкин В. Приборы для измерения уровня/ В. Жданкин// Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 3. – С. 6-19.
5. Патрушева Т.В. Способ контроля уровня жидкости на основе генератора хаотических колебаний/ Т.В. Патрушева, Е.М. Патрушев// Ползуновский вестник. – 2012. – №3/2. – С. 149-152.
6. Ма С. Методы измерения уровня и границ раздела многофазных жидких сред/ С. Ма, А.Б. Степанов// Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VI научно-практической конференции, Томск, 27-30 мая 2015 г. – С. 65-69. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/22250> (дата обращения: 1.11.2016).
7. Абросимов Е.Н. Измерение плотностей и границы раздела между слоями двухслойной жидкости в резервуаре/ Е.Н. Абросимов, А.Л. Шеста-

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ И ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

ков// Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 2. – с. 9-13. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-plotnostey-i-granitsy-razdela-mezhdusloyami-dvuhslonoy-zhidkosti-v-rezervuare> (дата обращения: 1.11.2016).

8. Лункин Б.В. Определение положения границ раздела слоистых сред с помощью радиочастотных датчиков/ Б.В. Лункин, Н.А. Криксунова // Датчики и системы. – 2007. – № 1. – с. 8 – 11.

9. Gong C.-S.A. Low-Cost Comb-Electrode Capacitive Sensing Device for Liquid-Level Measurement/ C.-S.A. Gong, H.K. Chiu, L.R. Huang, Ch.H. Lin, Z.D. Hsu, P.-H. Tu.// IEEE SENSORS JOURNAL. 2016. – Vol. 16. – № 9. – С. 2896–2897. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7397857> (дата обращения: 1.11.2016).

10. МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: Изд-во стандартов, 1991 – 9 с.

Плотникова Инна Васильевна – к.т.н., доцент кафедры Физических методов и приборов контроля качества Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, e-mail: inna@tpu.ru, тел. (3822) 41-73-07.

Степанов Александр Борисович – ст. преподаватель кафедры Физических методов и приборов контроля качества Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, e-mail: sab@tpu.ru, тел. (3822) 41-73-07.

Якшигильдина Розалия Ильнуровна – студент кафедры Физических методов и приборов контроля качества Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, e-mail: rozochka2705@mail.ru, тел. (3822) 41-73-07.