

ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ ДАТЧИК УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Джежора А.А.¹, Рубаник В.В.²

¹Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Республика Беларусь

²Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Республика Беларусь

Предложен двухпараметровый датчик уровня жидкости, состоящий из трех цилиндрических электродов разной длины с варьируемым потенциалом среднего электрода. Методом интегральных уравнений проведено численное 3D-моделирование конструкции датчика. Программа численного расчета реализована в MAPLE. Проведена проверка на адекватность модели реальным конструкциям датчиков. Экспериментально и теоретически показаны преимущества разработанного датчика, позволяющего в отличие от широко используемых однопараметровых датчиков одновременно измерять диэлектрические свойства жидкости и ее уровень без дополнительной калибровки.

(E-mail: Jezhora@mail.ru)

Ключевые слова: двухпараметровый датчик уровня жидкости, модель, адекватность модели.

Введение

Для контроля уровня топлива в настоящее время используют однопараметровые датчики уровня топлива (ДУТ) различных модификаций [1]. Принцип их работы основан на линейной зависимости емкости коаксиального конденсатора от высоты уровня жидкого диэлектрика. Емкость конденсатора определяется диэлектрической проницаемостью топлива, диэлектрической проницаемостью паров над уровнем топлива, высотой уровня топлива, геометрическими параметрами самого конденсатора. В связи с тем, что диэлектрическая проницаемость топлива зависит от сортности топлива [2], его температуры, наличия присадок, сторонних добавок, абсорбированной влаги, то погрешность измерения уровня топлива посредством коаксиального цилиндрического конденсатора велика и может достигать 10–20 %.

Цель работы – разработать двухпараметровый датчик, дающий возможность контролировать уровень топлива с погрешностью, меньшей чем в однопараметровых датчиках, и позволяющий проводить оценку сортности топлива. Конструктивно датчик представляет собой три коаксиальных цилиндра (рисунок 1). Длина внутреннего цилиндрического электрода 1 меньше длины охватывающих его цилиндрических электродов 2 и 3. Средний электрод 2 с помощью коммутатора попеременно подключается к цилиндрическим электродам 1 и 3, что

позволяет попеременно измерять диэлектрические параметры контролируемого топлива в объемах $V_2 = \pi(R_5^2 - R_4^2) \cdot l_2$ и $V_1 = \pi(R_3^2 - R_2^2) \cdot l_1$

цилиндрических конденсаторов длиной l_1 и l_2 . Для нахождения аналитических выражений взаимосвязи диэлектрических параметров контролируемой жидкости, ее уровня с емкостями цилиндрических конденсаторов двухпараметрового датчика создана математическая модель датчика с учетом реальных геометрических размеров электродов, решены прямая и обратная задачи.

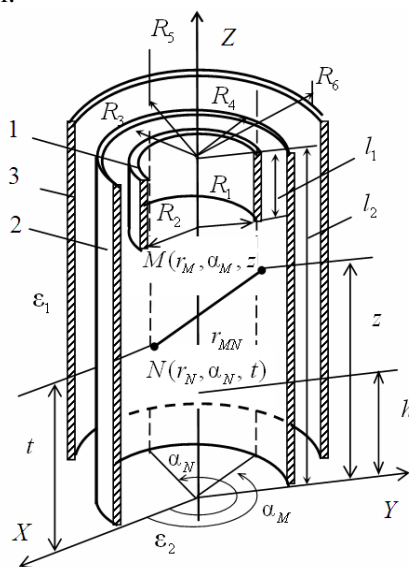


Рисунок 1 – Поперечное сечение двухпараметрового датчика уровня топлива

Моделирование

Математическая модель датчика строилась исходя из длины и толщины его цилиндрических электродов, с учетом электрических свойств контролируемой жидкости.

Для численного 3D-моделирования использован метод интегральных уравнений Фредгольма первого рода. В отличие от метода конечных элементов, данный метод менее требователен к вычислительным ресурсам и позволяет проводить расчеты емкостных датчиков без потери точности за более короткий промежуток времени.

При создании математической модели датчика каждый из трех электродов рассматривался в виде соосных бесконечно тонких цилиндрических эквипотенциальных поверхностей с различной плотностью заряда $\sigma_s(R_s, t)$. Такой подход позволил учесть реальные геометрические размеры электродов, их толщину и исследовать характер распределения поля вне межэлектродного зазора. В силу этого поверхностная плотность заряда для каждой из эквипотенциальных поверхностей электродов цилиндрического датчика является функцией одной переменной t вдоль оси OZ $\sigma_s(R_s, t)$ [3]. В качестве исходного выражения при составлении интегральных уравнений использовали зависимость для потенциала [3]:

$$V_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_1} \int_s \sigma(s) \frac{1}{r_{MN}} ds, \quad (1)$$

где $\sigma(s)$ – поверхностная плотность заряда на электродах; s – поверхность интегрирования.

С учетом того, что расстояние в цилиндрической системе координат между точкой наблюдения $M(r_M, \alpha_M, z)$ и переменной точкой $N(r_N, \alpha_N, t)$ определяется:

$$r_{MN} = \sqrt{(t-z)^2 + r_M^2 + r_N^2 - 2r_M r_N \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad (2)$$

для электродов цилиндрического датчика, расположенного в двухслойной среде,

$$\epsilon(z) = \begin{cases} \epsilon_1 & \text{при } z > h, q = 1, \\ \epsilon_1 & \text{при } z < h, q = 2, \end{cases} \quad (3)$$

система интегральных уравнений примет вид:

$$\int_0^{l_m} \sigma_s(R_s, t) R_s dt \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{r_{MN_s}} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_q V_m, \quad (4)$$

где R_s – радиусы внутренних, внешних поверхностей цилиндрических электродов; $\sigma_s(R_s, t)$ – соответствующие им поверхностные плотности заряда; ϵ_q – диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся электроды либо часть электродов; V_m – потенциалы на электродах, $s = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; $m = 1, 2, 3$. Высокопотенциальный электрод 1 имеет потенциал V_1 , низкопотенциальный электрод 3 – потенциал V_3 . Потенциал электрода 2 попеременно принимает значения потенциала первого электрода V_1 , затем третьего V_3 .

В результате алгебраических преобразований системы (4) ядра алгебраических уравнений после подстановки координат точек наблюдения z_{jm} вместо z принимают вид:

$$R_s \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\sqrt{(t-z_{jm})^2 + R_s^2 + R_m^2 - 2R_m R_s \cos(\alpha)}} = K(z_{jm}, t), \quad (5)$$

где модуль эллиптического интеграла k :

$$k = \sqrt{\frac{4R_s R_m}{(t-z_{jm})^2 + (R_s + R_m)^2}}. \quad (6)$$

Решение системы интегральных уравнений осуществлялось методом Крылова–Боголюбова. Для дискретизации функций $\sigma_s(R_s, t)$ цилиндрические поверхности электродов разбивались на кольца, в пределах которых поверхностная плотность заряда принимает постоянные значения. Для улучшения сходимости решения шаг интегрирования по цилиндрическим поверхностям задавался переменным и записывался с помощью геометрической прогрессии. Границы интегрирования для поверхностей электрода 1:

$$\alpha_i = l_2 - l_1 / 2 - l_1 (1 - q_1^{N-i+1}) / 2(1 - q_1^{N_1}), \quad (7)$$

$$\beta_i = l_2 - l_1 / 2 - l_1 (1 - q_1^{N-i}) / 2(1 - q_1^{N_1}), \quad (8)$$

где $i = 1, 2, \dots, N_1$; для верхней половины:

$$\alpha_i = l_2 - l_1 / 2 + l_1 (1 - q_1^{i-N_1-1}) / 2(1 - q_1^{N_1}), \quad (9)$$

$$\beta_i = l_2 - l_1 / 2 + l_1 (1 - q_1^{i-N_1}) / 2(1 - q_1^{N_1}), \quad (10)$$

где $i = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, 2N_1$; l_1 – длина внутреннего электрода 1; q_1 – знаменатель геометрической прогрессии; $2N_1$ – число разбиений l_1 .

Разбиений цилиндрических поверхностей для электродов 2 и 3 до координаты $z = l_2 - l_1$ осуществлялось подобно разбиению для электрода 1, т.е.

$$\alpha_i = (l_2 - l_1) / 2 - (l_2 - l_1) (1 - q_3^{4N_1+N_0-i+1}) / 2(1 - q_3^{N_0}), \quad (11)$$

$$\beta_i = (l_2 - l_1) / 2 - (l_2 - l_1) (1 - q_3^{4N_1+N_0-i}) / 2(1 - q_3^{N_0}), \quad (12)$$

и

$$\alpha_i = (l_2 - l_1) / 2 + (l_2 - l_1) (1 - q_3^{i-4N_1-N_0-1}) / 2(1 - q_3^{N_0}), \quad (13)$$

$$\beta_i = (l_2 - l_1) / 2 + (l_2 - l_1) (1 - q_3^{i-4N_1-N_0}) / 2(1 - q_3^{N_0}), \quad (14)$$

где $2N_0$ – число разбиений на отрезке длиной $l_2 - l_1$.

Выше $z > l_2 - l_1$ границы интегрирования совпадали с границами интегрирования для электрода 1. В результате система интегральных уравнений (4) примет вид:

$$\sum_{j=1}^{12N_1+8N_0} \sum_{i=1}^{12N_1+8N_0} \sigma_i \int_{\alpha_i}^{\beta_i} K(z_{jm}, t) dt = 4\pi\epsilon_0\epsilon_q V_m, \quad (15)$$

где

$$z_{jm} = (\alpha_j + \beta_j) / 2; \quad j = 1, 2, \dots, 12N_1 + 8N_0, \quad (16)$$

индекс $m = 1, 2, 3$.

Интеграл $\int_{\alpha_i}^{\beta_i} K(z_{jm}, t) dt$ может быть записан

в новых переменных через модуль эллиптического интеграла k . Тогда:

$$\int_{\alpha_i}^{\beta_i} K(z_{jm}, t) dt = 8\sqrt{R_m R_l^3} \cdot \int_{k_{\alpha ij}}^{k_{\beta ij}} \frac{K(k)}{k\sqrt{4R_s R_m - k^2(R_s + R_m)^2}} dk, \quad (17)$$

где интервалы интегрирования:

$$k_{\alpha ij} = \sqrt{4R_s R_m / [(\alpha_i - z_{jm})^2 + (R_l + R_m)^2]}, \quad (18)$$

$$k_{\beta ij} = \sqrt{4R_s R_m / [(\beta_i - z_{jm})^2 + (R_l + R_m)^2]}.$$

Индекс s отвечает поверхности интегрирования, m – эквипотенциальной поверхности, для которой записывается выражение потенциала.

Система линейных алгебраических уравнений в однородной среде примет вид:

$$\sum_{j=1}^{12N_1+8N_0} \sum_{i=1}^{12N_1+8N_0} \sigma_i 8\sqrt{R_m R_s^3} \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \frac{K(k)}{k\sqrt{4R_s R_m - k^2(R_s + R_m)^2}} dk = 4\pi\epsilon_0\epsilon_q V_m. \quad (19)$$

Недостающее уравнение для определения взаимосвязи потенциалов V_1 , V_2 и V_3 составляется исходя из равенства нулю общего заряда цилиндрического конденсатора:

$$2\pi R_1 \sum_{i=1}^{2N_1} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) + 2\pi R_2 \sum_{i=2N_1+1}^{4N_1} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) + 2\pi R_3 \sum_{i=4N_1+1}^{6N_1+2N_0} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) + 2\pi R_4 \sum_{i=6N_1+2N_0+1}^{8N_1+4N_0} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) + 2\pi R_5 \sum_{i=8N_1+4N_0+1}^{10N_1+6N_0} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) + 2\pi R_6 \sum_{i=10N_1+6N_0+1}^{12N_1+8N_0} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) = 0. \quad (20)$$

Исходя из найденных решением (19) и (20) дискретных значений σ_i в зависимости от значения потенциала на электроде 2 емкость цилиндрического датчика в воздухе ($\epsilon_1 = 1$) записывается:

в случае $V_2 = V_3$:

$$C_1 = \frac{2\pi l_1 \left(R_1 \sum_{i=1}^{2N_1} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) + R_2 \sum_{i=2N_1+1}^{4N_1} \sigma_i (\beta_i - \alpha_i) \right)}{V_1 - V_2}, \quad (21)$$

в случае $V_2 = V_1$:

$$C_2 = \frac{2\pi l_2 \left(R_3 \sum_{i=4N_1+1}^{6N_1+2N_0} \sigma_i(\beta_i - \alpha_i) + R_4 \sum_{i=6N_1+2N_0+1}^{8N_1+4N_0} \sigma_i(\beta_i - \alpha_i) \right)}{V_2 - V_3} \quad (22)$$

Экспериментальные результаты

Классическое выражение емкости цилиндрического конденсатора не учитывает толщину цилиндрических электродов и полагает, что их длина бесконечно велика по сравнению с радиусами цилиндров.

Расчетные картины распределения заряда по поверхности цилиндрических электродов для датчика с размерами электродов $R_1 = 1,6$ мм, $R_2 = 2,6$ мм, $R_3 = 5,95$ мм, $R_4 = 7,0$ мм, $R_5 = 8,9$ мм, $R_6 = 9,95$ мм, $l_1 = 299$ мм, $l_2 = 204$ мм в воздухе ($\epsilon_1 = 1$), представлены на рисунках 2 и 3.

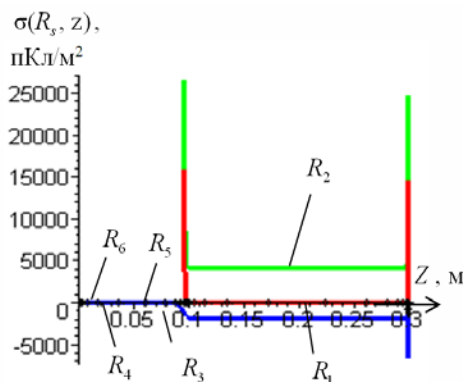


Рисунок 2 – Расчетная картина распределения зарядов по поверхности электродов радиусов R_s ($V_3 = V_2$)

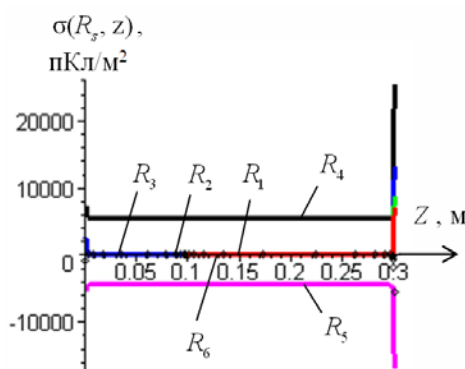


Рисунок 3 – Расчетная картина распределения зарядов по поверхности электродов радиусов R_s ($V_1 = V_2$)

Из кривых распределения заряда по поверхности электродов видно, что поле однородно, за исключением поля на торцах электродов. В случае когда потенциал электрода 3

совпадает с потенциалом электрода 2 измеренная емкость датчика $C_1 = 13,70$ пФ, рассчитанная численно $C_1^{числ} = 13,80$ пФ, аналитически $C_1^{ан} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_1 l_1 / \ln(R_3 / R_2) = 13,63$ пФ. В случае когда потенциалы $V_1 = V_2$, характер поля изменяется и емкость возрастает. Измеренная емкость датчика $C_2 = 69,62$ пФ, рассчитанная численно $C_2^{числ} = 69,75$ пФ, рассчитанная аналитически $C_2^{ан} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_1 l_2 / \ln(R_5 / R_4) = 69,24$ пФ. Ошибка расчета емкостей двухпараметрового датчика численным методом не превосходит 1 %. Несколько выше ошибка расчета емкостей с помощью классического аналитического выражения. Но и эта ошибка не превышает 1 %. Этот факт говорит о том, что в случаях, когда межэлектродные зазоры датчика $R_3 - R_2$, $R_5 - R_4$ на порядок меньше длин электродов l_1 и l_2 , с достаточно высокой степенью точности для решения прямых и обратных задач может быть использовано аналитическое выражение емкости цилиндрического конденсатора $2\pi\epsilon_0\epsilon_1 l / \ln(R_{s+1} / R_s)$.

На рисунке 4 представлена расчетная картина эквипотенциальных линий поля двух параметрового датчика ($V_3 = V_2$). Как видно, поле сконцентрировано в пределах межэлектродного зазора $R_3 - R_2$ между первым и вторым цилиндрами по всей длине l_1 . Об этом говорит и малое различие между расчетными и измеренными значениями емкостей датчика ($\delta C < 1\%$).

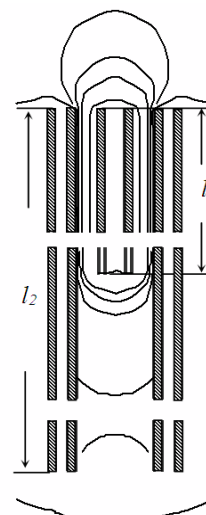


Рисунок 4 – Расчетная картина эквипотенциальных линий поля ($V_3 = V_2$)

Экспериментальные результаты взаимосвязи уровня жидкой среды и емкости датчика, представлены на рисунке 5. Прямая 1 соответствует дизельному топливу без добавок ($\epsilon_2 = 2,13$), 2 – с добавками ($\epsilon_2 = 2,15$), прямая 3 – рапсовому маслу ($\epsilon_2 = 3,01$), прямая 4 – подсолнечному ($\epsilon_2 = 3,03$). Графики на рисунке 5 подтверждают, что зависимость емкости датчика C_2 от высоты уровня жидкости имеет линейный характер.

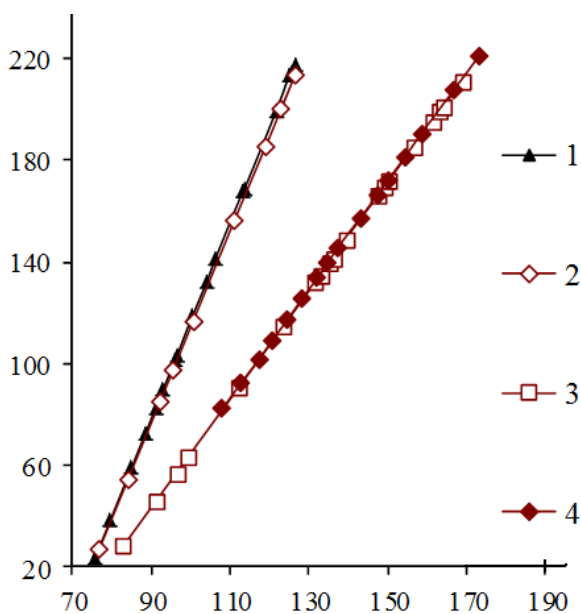


Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость между высотой уровня жидкости h и емкостью датчика C_2

Изменение потенциала на электроде 2 позволяет измерять две емкости датчика C_1 и C_2 . Емкость датчика C_1 определяется глубиной погружения электродов в жидкость $h - (l_2 - l_1)$, емкость C_2 определяется глубиной погружения h . Различие в глубинах погружения позволяет определять диэлектрическую проницаемость контролируемой жидкости через разность нормированных емкостей $\frac{C_1(h)}{C_1(0)}$,

$\frac{C_2(h)}{C_2(0)}$ как:

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_1}{l_2 - l_1} \left(\frac{C_2(h)}{C_2(0)} l_2 - \frac{C_1(h)}{C_1(0)} l_1 \right), \quad (23)$$

$$\text{где } \frac{C_2(h)}{C_2(0)} = 1 - \frac{h}{l_2} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{h}{l_2}; \quad \frac{C_1(h)}{C_1(0)} = \frac{l_2 - h}{l_1} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{h - l_2 + l_1}{l_1}$$

и определяются диэлектрической проницаемостью контролируемой жидкости, длиной электродов и высотой уровня h ; $C_1(0)$ и $C_2(0)$ – емкости в воздухе.

В процессе измерения, пока уровень не опустится ниже $l_2 - l_1$, рассчитывается диэлектрическая проницаемость жидкости, а затем, исходя из измеренных значений $C_1(h)$ и $C_2(h)$, вычисляется высота уровня жидкости для каждого значения потенциала на электроде 2:

$$h_{V_1=V_2} = \frac{C_2(h) - C_2(0)}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \frac{\epsilon_1 l_2}{C_2(0)}, \quad (24)$$

$$h_{V_3=V_2} = \frac{C_1(h) - C_1(0)}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \frac{\epsilon_1 l_1}{C_1(0)} + l_2 - l_1. \quad (25)$$

Высота уровня зависит только от одного неизмеряемого параметра – диэлектрической проницаемости газообразной среды ϵ_1 . Колебания ϵ_1 незначительны и могут быть усреднены ($\epsilon_1 \approx 1,0006$).

Так как высота уровня жидкости описывается аналитическими выражениями (24) и (25), то рассмотренный датчик может выполнять калибровку самостоятельно, в независимости от диэлектрической проницаемости жидкости. Графики построенные согласно выражениям (24) и (25) ложатся на экспериментальные прямые, представленные на рисунке 5. Для всех исследуемых жидкостей (дизельное топливо, подсолнечное и рапсовое масла) ошибка расчета уровня не превышала 1,5 мм. В зоне краевого эффекта, когда $h = l_2 - l_1 = 95$ мм, ошибка определения уровня составила 2,0 мм.

Заключение

Предложен двухпараметровый датчик уровня топлива, позволяющий одновременно контролировать диэлектрические свойства жидких сред и проводить оценку сортности топлива. Погрешность измерения уровня топлива не превышает 1 %. Датчик не требует предварительной калибровки; он имеет такие же размеры как и традиционный однопараметровый датчик уровня топлива.

Список использованных источников

1. *Zhao, Y.R.* New Type Multielectrode Capacitance Sensors for Liquid Level. *Journal of Physics: Conference Series*. – 2006. – Vol. 48. P. 223–227.
2. *Скворцов, Б.В.* Статистическое моделирование компонентного состава углеводородных топлив и исследование взаимосвязей детонационной стойкости с их электродинамическими параметрами / Б.В. Скворцов, Е.А. Силов, Л.В. Солнцева // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – 2010. – № 1. – С. 166–173.
3. *Джежора, А.А.* Цилиндрический электроемкостной датчик уровня / А.А. Джежора // Датчики и системы. – 2010. – № 9. – С. 7–11.

Jezhora A.A., Rubanik V.V.

The two parameter sensors of the liquid level

It is considered two parameter the sensors of level of a liquid. The sensors contains three cylindrical electrodes of unequal length. The potential of an average electrode varies. For the control of dielectric properties of a liquid the length of an internal electrode differs from length of two external electrodes. For numerical 3D sensors modelling the method of the integrated equations and mirror displays is used. The program of numerical calculation is realised in MAPLE. Check on adequacy of model to real designs is checked up. (E-mail: Jezhora@mail.ru)

Key words: two parameter the sensor of level of a liquid, model, adequacy of model.

Поступила в редакцию 16.04.2012.