

УДК 621.3.084.827

КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ТОПЛИВА

канд. техн. наук, доц. А.А. ДЖЕЖОРА
(Витебский государственный технологический университет);
д-р техн. наук В.В. РУБАНИК
(Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск);
канд. физ.-мат. наук, доц. В.К. САВЧУК
(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова)

Рассмотрено несколько групп емкостных датчиков уровня, разделяющихся по конструктивным признакам. Показаны их преимущества и недостатки. Электроды датчиков создают плоскопараллельные поля, благодаря чему и создается возможность контроля уровня. Исследуются пути повышения чувствительности электроемкостных датчиков уровня жидких или сыпучих сред. Показано, что датчики уровня должны обладать высокой жесткостью конструкции, так как снижение жесткости приводит к нарушению градуировочного графика, и как следствие, к дополнительным ошибкам измерения за счет утраты стабильности показаний. Создана математическая модель датчика, позволяющая оптимизировать конструкцию датчика уровня в зависимости от толщины слоя изоляции и его диэлектрической проницаемости.

Современные тенденции развития электроемкостных методов и средств контроля неразрывно связаны с решением следующих задач: повышением точности, разрешающей способности, воспроизводимости и стабильности в условиях различных дестабилизирующих факторов, таких как колебания температуры, давления, влажности воздуха, внешние электромагнитные воздействия, вибрации. Это в свою очередь требует разработки так называемых «интеллектуальных» первичных преобразователей, содержащих встроенные в них микроЭВМ или микропроцессоры. Именно они обеспечивают бесперебойность контроля технологического оборудования, следят за рациональным потреблением и расходом топлива.

Широко известны системы IntelliTrain фирмы «General motors Electro Motive Divison», применяемые на транспорте, которые осуществляют непрерывный контроль и обработку более 300 параметров. Одними из таких параметров является объем топлива, или его уровень в баке.

Электроемкостные датчики, осуществляющие контроль дизельного топлива. При верном выборе конструктивных параметров в электроемкостных датчиках может быть достигнуто линейное изменение емкости на протяжении сравнительно большой длины и по этой причине они используются для контроля уровня самых разнообразных сред. По конструктивным признакам емкостные датчики уровня разделяются на несколько групп. *Первую группу* составляют датчики, выступающие в роли индикаторов достижения средой определенного уровня. Они миниатюрны и располагаются вертикально по всей высоте топливного бака. Их недостаток в том, что они не позволяют осуществлять непрерывный контроль. *Вторую группу* составляют самые простые датчики, выполненные в виде изолированного стержня, при этом роль второго электрода выполняют либо металлические стенки емкости, либо дополнительный электрод без изоляции [1]. Изменение емкости датчика прямо пропорционально глубине погружения изолированного электрода в топливо. Однако такой датчик широкого распространения не получил в силу целого ряда причин, связанных с влиянием внешних полей, с конструктивными особенностями крепления электродов. *Третья группа* емкостных датчиков представляет собой цилиндрический конденсатор с внутренним электродом, покрытым изоляционным слоем, и наружным цилиндрическим электродом, в зазоре между которыми находится контролируемая среда [2]. Недостатком таких датчиков является неудобство их использования, трудности контроля уровня загрязненных сред, влияние эффектов смачивания и налипания контролируемой среды на стенки электродов. Техническое обслуживание таких датчиков требует их разборки и последующей градуировки. *Четвертую группу* представляют датчики ленточного типа [3]. Их электроды расположены внутри изоляционного слоя, заполняющего все межэлектродное пространство. Для создания жесткой конструкции они могут быть закреплены на защитном экране. Поскольку зазор между электродами не заполняется топливом, он не засоряется и остается постоянным. Датчики такой группы просты в эксплуатации. Однако и этой группе присущи недостатки, связанные с долей паразитной емкости, образованной в изоляционном слое датчика. Так, при заполнении датчика топливом его емкость изменяется только на 25 % по сравнению с «сухим» датчиком [3]. Для увеличения чувствительности таких датчиков приходится увеличивать долю рабочей емкости за пределами изоляционного слоя. С этой целью увеличивают межэлектродный зазор и, как следствие, габариты датчика, что не всегда правомочно.

Все рассмотренные группы, за исключением первой, объединяет одно общее свойство – электроды датчиков создают плоскопараллельные поля. Благодаря этому создается возможность контроля уровня.

Несмотря на высокую стабильность, емкостные датчики уровня, подключаемые по двухэлектродной схеме измерения, дают погрешность 4 %, в силу того, что подводящие провода и сама конструкция создают паразитную емкость, снижая тем самым чувствительность датчика.

Радикальное средство исправления этого недостатка – использование датчиков, подключаемых по трехэлектродной схеме измерения (рис. 1). В таких датчиках измерения уровня топлива потенциальные электроды 1 и 2 разделены охранными электродами 3, потенциал которых равен нулю [4 – 6]. Все электроды расположены в изоляционном слое 4.

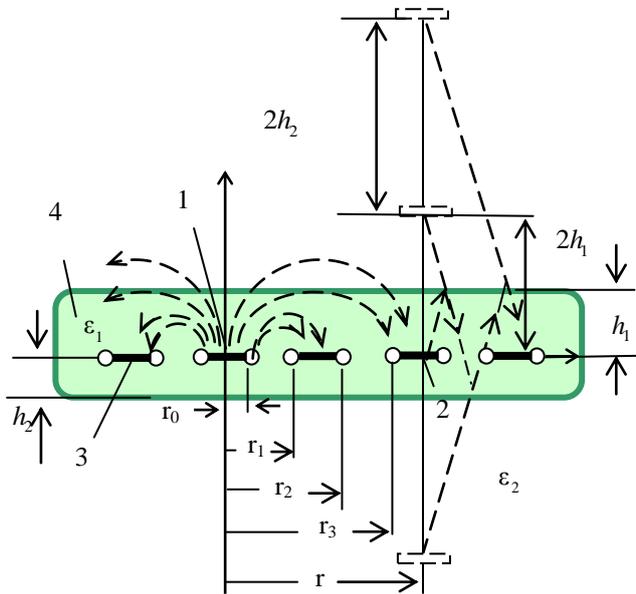


Рис. 1. Поперечное сечение датчика уровня:
1, 2 – потенциальные электроды; 3 – охранные электроды;
4 – изоляционный слой

Для «сухого» датчика граница раздела представляет собой двухслойную среду с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 1$, для «мокрого» с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 2,2$.

$$\varepsilon(y) = \begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 & \text{если } y \geq h_1; \\ \varepsilon = \varepsilon_2 & \text{если } h_2 \leq y \leq h_1; \\ \varepsilon = \varepsilon_1 & \text{если } y \leq h_2. \end{cases}$$

Используя метод зеркальных отображений [7] (см. рис. 1), учтем наведенные на границах раздела слоев заряды. Тогда коэффициент отражения для зарядов верхней и нижней половин датчика λ_1 будет равен

$$\lambda_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Положим, что длина электродов намного больше их ширины, а число секций бесконечно велико (см. рис. 1). В этом случае электромагнитное поле можно рассматривать как плоскопараллельное и расчеты производить на единицу длины электродов. Так как число секций бесконечно велико, то функция распределения зарядов одинакова на всех электродах и симметрична относительно их оси. Это упрощает расчеты и позволяет составить интегральные уравнения для потенциалов электродов только одной центральной секции, с учетом влияния остальных секций.

Через $\sigma_1(x)$ обозначим поверхностную плотность зарядов на потенциальных электродах, через $\sigma_2(x)$ – на виртуальных, через $\sigma_3(x)$ – на охранных электродах, потенциал которых практически совпадает с потенциалом охранных электродов. Очевидно, что в силу симметрии будет иметь место электрическая симметрия:

$$\sigma_j(x) = \sigma_j(-x), \quad j = 1, 2, 3. \quad (1)$$

С учетом условий симметрии (1)

$$\sigma_j(2ri - x) = \sigma_j(2ri + x) = \sigma_j(x) = \sigma_j(x), \quad (2)$$

где r – ширина секции датчика.

электроды расположены в изоляционном слое 4. Поле такого датчика разбито на две области: паразитную и рабочую. Паразитная область создается частью силовых линий, замыкающихся на охранный электрод 3, и исключается из измерения. Вследствие этого достигаются следующие эффекты: резко уменьшается первоначальная емкость датчика, за счет исключения части потока силовых линий между потенциальными электродами 1 и 2; область зоны контроля выходит за пределы изоляционного слоя 4.

Граница зоны, с которой начинается контроль h , определяется зазором между потенциальными электродами, размером охранный электрода, его расположением, диэлектрической проницаемостью изоляционного слоя ε_1 и контролируемой среды ε_2 . Рабочая область поля образуется за пределами изоляционного слоя, непосредственно в области расположения контролируемой жидкости. С целью оптимизации конструкции такого датчика создадим его математическую модель и определим, как влияет изоляционный слой на чувствительность датчика.

Тогда, принимая потенциал потенциального электрода равным V_1 , охранного V_2 , виртуального $V_3 = V_2$, согласно теории потенциалов для плоскопараллельных полей получим:

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| ((2ri \pm t)^2 - x^2) \right| dt + \sum_{j=1}^3 \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| t^2 - x^2 \right| dt + \\
& + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^Z \left(\frac{\lambda_1}{2} \right)^{2k-1} \left(\sum_{i=1}^n \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| ((2ri \pm t \pm x^2) + (2h_1k + 2h_2(k-1))^2) \right| dt \right) + \\
& + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^Z \left(\frac{\lambda_1}{2} \right)^{2k-1} \left(\int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| ((t \pm x^2) + (2h_1k + 2h_2(k-1))^2) \right| dt \right) + \\
& + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^Z \left(\frac{\lambda_1}{2} \right)^{2k-1} \left(\sum_{i=1}^n \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| ((2ri \pm t \pm x^2) + (2h_2k + 2h_1(k-1))^2) \right| dt \right) + \\
& + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^Z \left(\frac{\lambda_1}{2} \right)^{2k-1} \left(\sum_{i=1}^n \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| ((t \pm x^2) + (2h_2k + 2h_1(k-1))^2) \right| dt \right) + \\
& + \sum_{j=1}^3 2 \sum_{k=1}^Z \left(\frac{\lambda_1}{2} \right)^{2k} \left(\sum_{i=1}^n \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| ((2ri \pm t \pm x^2) + ((2h_1 + 2h_2)k)^2) \right| dt \right) + \\
& + \sum_{j=1}^3 2 \sum_{k=1}^Z \left(\frac{\lambda_1}{2} \right)^{2k} \left(\sum_{i=1}^n \int_{\alpha_j}^{\beta_j} \sigma_j(t) \ln \left| ((t \pm x^2) + ((2h_1 + 2h_2)k)^2) \right| dt \right) = -2\pi\epsilon_1\epsilon_0 V_j,
\end{aligned} \tag{3}$$

где $j = 1, 2, 3$; x – координата точки на каждом из электродов; α_j, β_j – координата краев для каждого из электродов.

Полный заряд системы равен нулю:

$$\sum_{j=1}^3 \sigma_j = 0. \tag{4}$$

Для численного решения системы интегральных уравнений (3), (4) был использован метод Крылова – Боголюбова, согласно которому промежутки интегрирования разбивался на участки, где искомые функции $\sigma_j(x)$ принимали постоянные значения и выносились за знак интеграла. Таким образом, интегральные уравнения преобразовывались в систему линейных алгебраических уравнений, решение которой дает дискретные значения искомых функций. Для улучшения сходимости решения шаг интегрирования выбирался переменным и задавался с помощью геометрической прогрессии.

Частичные емкости преобразователя определяются, как отношение суммарного заряда на электродах к разности потенциалов.

Так, паразитная емкость C_n в диэлектрической подложке и рабочая емкость C_p , образованная потоком силовых линий электрического поля за пределами подложки, определяются как

$$C_n = \frac{n}{V_1 - V_2} \left[\sum_{l=1}^{m_1} \sigma_{3l} s_l \right] L, \quad C_p = \frac{n}{V_1 - V_2} \left[\sum_{l=1}^{m_2} \sigma_{2l} s_l \right] L, \tag{5}$$

где n – число секций; m_1, m_2 – число разбиений поверхности электродов; s_l – длина шага интегрирования поверхности электродов; L – длина электродов.

Расчеты проводились для двух датчиков. Первый имел изоляцию из полипропилена (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_1 = 2,4$), второй – из стекла (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_1 = 7,8$). Диэлектрическая проницаемость дизельного топлива $\epsilon_2 = 2,2$. Каждый слой изоляции имел одинаковую толщину $h = h_1 = h_2$. Сравнивались датчики с охраняемым электродом $r_2 - r_1 = r_0$ и без него $r_2 - r_1 = 0$. Чувствительность датчика определяется отношением $\Delta C / C_0$. Для ее повышения необходимо увеличивать изменение емкости ΔC , вызванное погружением датчика в жидкость, и уменьшать первоначальную емкость C_0 . Увеличение ΔC достигается уменьшением толщины слоя изоляции h , а уменьшение C_0 – введением охранного электрода.

Результаты расчета чувствительности датчиков $\Delta C/C_0$ с охранным электродом и без него в зависимости от относительной толщины изоляционного слоя h/r ($h_1 = h_2$) приведены на рисунке 2.

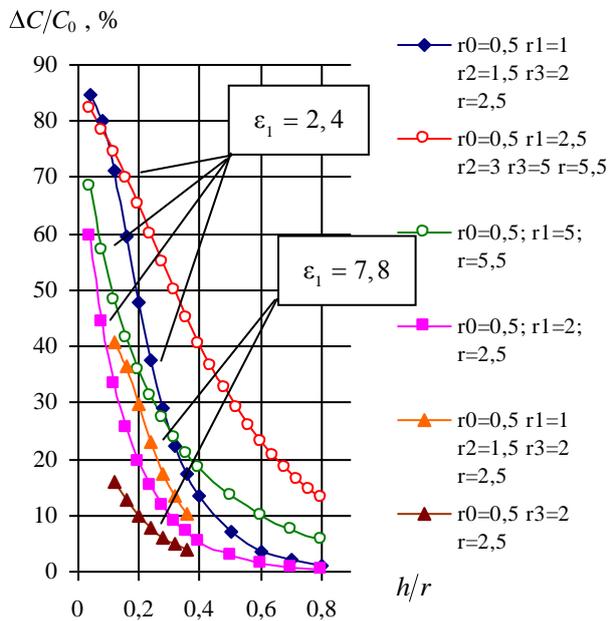


Рис. 2. Зависимость относительного изменения емкости $\Delta C/C_0$ от относительной толщины слоя изоляции h/r

слоя занимаемого изоляцией. В результате уменьшается паразитная емкость, чувствительность датчика к изменению уровня жидкости за пределами изоляционного слоя возрастает.

Датчики уровня должны обладать высокой жесткостью конструкции. Снижение жесткости приводит к нарушению градуировочного графика и, как следствие, к дополнительным ошибкам измерения за счет утраты стабильности показаний. Жесткость датчика можно увеличить за счет жесткости электродов, увеличивая толщину лент электродов, за счет увеличения толщины слоя изоляции и за счет крепления датчика на жестком экране. В первых двух случаях происходит увеличение паразитной емкости, образованной в слое изоляции, что приводит к уменьшению чувствительности для датчика без охранный электрода [3]. В случае жесткого крепления датчика на защитный металлический экран происходит снижение чувствительности за счет потери половины рабочей области датчика, так как она не имеет доступа к жидкости. Достоинством рассматриваемой конструкции датчика с охранным электродом является то, что охранный электрод позволяет устранять паразитную емкость в слое изоляции, независимо от толщины электродов. Жесткость датчика [6] может быть достигнута за счет жесткости самих электродов, имеющих тонкий внешний слой изоляции h . Это позволяет значительно повысить чувствительность датчика и обеспечить жесткость его конструкции. Кривые на рисунке 3 подтверждают экспериментальные кривые на рисунке 4. Чувствительность датчика с охранным электродом к изменению уровня топлива [6] всегда выше чувствительности датчика без охранный электрода [3].

Из графиков видно, что относительное изменение рабочей емкости датчика $\Delta C/C_0$ с охранным электродом всегда выше, чем у датчика без охранный электрода, независимо от геометрических размеров электродов, диэлектрической проницаемости слоя изоляции ϵ_1 и ее толщины h . Причем датчик с охранным электродом работает и в области тонкого слоя диэлектрика $h \leq r_3 - r_0$, когда межэлектродный зазор $r_3 - r_0$ уменьшается в 3 раза. Относительное изменение емкости датчика с охранным электродом в этом случае остается практически неизменным и составляет 84 %, в то время как для датчика без охранный электрода относительное изменение емкости падает с 68 до 59 %. Чувствительности датчика зависит от относительного размера охранный электрода $(r_2 - r_1)/(r_3 - r_0)$, что иллюстрирует рисунок 3. Влияние охранный электрода тем больше, чем меньше относительная толщина слоя изоляции h/r . С увеличением относительного размера охранный электрода увеличивается доля потока электрического поля, исключаемого из

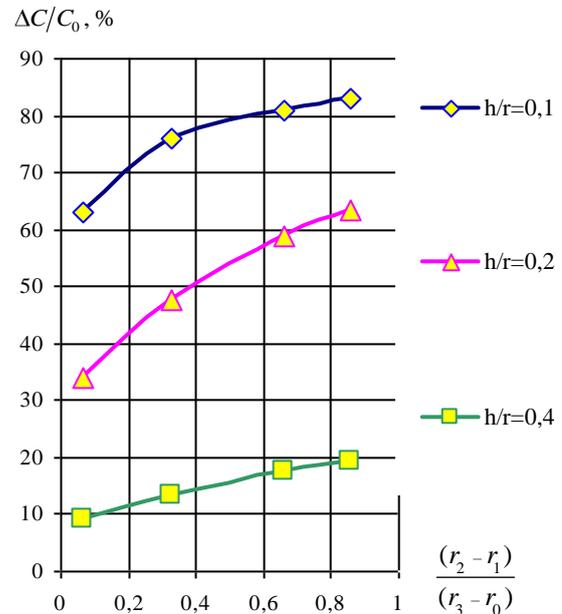


Рис. 3. Зависимость относительного изменения емкости $\Delta C/C_0$ от относительного размера охранный электрода $(r_2 - r_1)/(r_3 - r_0)$ при постоянном межэлектродном зазоре $(r_3 - r_0) = 0,6 r$, $\epsilon_1 = 2, 4$

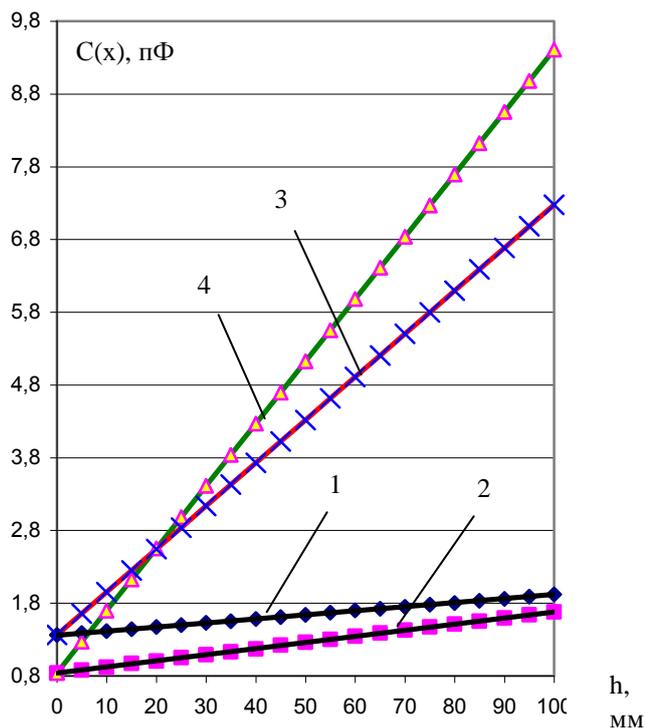


Рис. 4. Графики зависимости емкости датчика от уровня контролируемой среды

Заключение. Многосекционные плоские накладные измерительные конденсаторы позволяют измерять целый спектр физических параметров жидких сред в широком частотном диапазоне. В этом случае изоляционная подложка выполняется из недисперсионного материала (тефлон, полипропилен). Наличие охранного электрода в подложке повышает чувствительность датчиков к измеряемому параметру. Такой датчик может найти применение и при контроле уровня сыпучих сред. На рисунке 4 представлены графики, полученные в случае контроля уровня кварцевого песка. Два датчика – один с охранными электродами, второй без них – имели одинаковые геометрические размеры и засыпались кварцевым песком. Кривая 3 соответствует датчику без охранного электрода, кривая 4 – датчику, содержащему дополнительный охранный электрод. Как и в случае контроля уровня дизельного топлива, чувствительность датчика с охранными электродами в два раза выше. Предлагаемый датчик может быть использован на транспорте, когда необходима высокая точность измерения уровня топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГКПНИ «Техническая диагностика-36» (№ 20062708).

ЛИТЕРАТУРА

1. Левшина, У.С. Электрические измерения физических величин / У.С. Левшина, П.В. Новицкий. – М.: Машиностроение, 1969. – 467 с.
2. Гусев, В.С. Авиационные топливомеры с электроемкостными детекторными датчиками // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Датчик-2003: материалы XV междунар. науч.-техн. конф., Судак, 2003 г. / В.С. Гусев, Н.В. Поливанов. – Судак, 2003. – С. 21 – 22.
3. Датчик для измерения уровня жидкости: пат. 2196966 РФ, МКИ G 01 F 23/26 / Г.В. Медведев, В.А. Мишин, В.Н. Шивринский. – № 2001108624/28; заявл. 30.03.2001; опубл. 20.01.2003.
4. Трехзажимные датчики с электродами дугообразного сечения / А.А. Джежора [и др.] // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XV междунар. конф., Ялта, 2007 г. – Ялта, 2007. – С. 3 – 6.
5. Электроемкостной уровнемер дизельного топлива / А.А. Джежора [и др.] // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: материалы XIII междунар. конф., Ялта, 2007 г. – Ялта, 2007. – С. 6 – 7.
6. Датчик измерения уровня жидкой или сыпучей среды: пат. 11930 ВУ, МКИ G 01F 23/26, G 01N 27/22 / А.А. Джежора, В.В. Рубаник, В.К. Савчук, А.В. Кузьминич.
7. Джежора, А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск: РУП «Издат. дом «Белорусская наука», 2008. – 305 с.

Поступила 21.09.2009

THE CONTROL OF LEVEL OF FUEL

A. JEZHORA, V. RUBANIK, V. SAVCHUK

Some groups of electro capacitor sensors of level divided according to constructive signs are considered. Their advantages and disadvantages are shown. Electro capacitor sensors create plane-parallel fields thanks to which possibility of the level control is created. Ways of increasing of sensitivity of electro capacitor sensors of the level of liquid or loose media are investigated. It is shown, that the level sensors should possess high design rigidity. Rigidity decrease leads to infringement of graduation curve and as a consequence to additional errors of measurement at the expense of loss of reading stability. The created mathematical model of the sensor has allowed optimizing a design of the level sensor depending on the insulation layer thickness and its dielectric permeability.