

УДК 681.89.082.75

## ЕМКОСТНОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

*Смирнитская М.Б., к.т.н., доц.*

*Украинская инженерно-педагогическая академия*

*610003 г. Харьков, ул. Университетская, 16*

*E – mail: kafotos @ uira, Kharkov, ua*

*Смирнитский Б.В., к.т.н., доц., Фомовский Ф.В., ст. викл.,*

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского*

*39614 г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

*E-mail: kafea @ polytech. poltava. ua*

Виконаний вибір ємнісного перетворювача рівня з врахуванням зміни відносної діелектричної проникності рідини у міжелектродному вимірному просторі. Проведений аналіз похибок при порушенні еквіпотенціальності поверхні електродів.

**Ключові слова:** електрод, перетворювач, рівень, ємність, похибка.

The choice of capacable level transformer including changes of the relative dielectric liquid penetration in the interelectrode of measurable space has been done in this article. There was given the analysis of errors at damages of electrode's surface equipotentialization.

**Key words:** electrode, transformer, level, capacity, error.

**Введение.** Ёмкостные преобразователи уровня жидких сред имеют существенные преимущества перед уровнемерами других типов. Они позволяют выполнять измерение уровня почти любых веществ, пригодны для контроля уровня в резервуарах с высоким давлением и температурой, относительно дешевы, надежны и безопасны в работе.

Ёмкостные преобразователи являются электрическими конденсаторами, ёмкость которых изменяется под действием площади перекрытия обкладок измеряемой жидкой средой, расположенной между электродами.

Существует множество конструктивных разновидностей ёмкостных преобразователей, основные отличия которых определяются величиной электропроводности измеряемой жидкости. В уровнемерах для электропроводных жидкостей один из электродов покрывают изоляционным материалом, для неэлектропроводных жидкостей электроды не изолируются. При этом электропроводные жидкости характеризуются параметрами: удельное электрическое сопротивление  $r < 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon < 7$ .

В уровнемерах для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей электроды преобразователей могут быть выполнены в виде стержней, плоских пластин или цилиндрическими. В качестве другого электрода может быть использована металлическая стенка резервуара с измеряемой жидкостью.

**Анализ предыдущих исследований.** Показания известных преобразователей уровня, цилиндрические электроды которых расположены параллельно друг другу и отстоят на некотором расстоянии друг от друга, зависят от изменения диэлектрической проницаемости измеряемой жидкости в межэлектродном пространстве.

С другой стороны, питание ёмкостного преобразователя уровня ведётся на высокой частоте. При этом предполагают, что поверхность каждого электрода эквипотенциальна, и при расчетах используется статическая ёмкость преобразователя. Однако при длинных электродах  $l \geq 6 \text{ м}$  преобразователя, высоких значениях диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости и повышенных рабочих частотах, эквипотенциальность поверхности электродов преобразователя нарушается, что приводит к погрешности измерения уровня жидкости.

**Цель работы.** Уменьшить зависимость результата измерений от изменения диэлектрической проницаемости в межэлектродном пространстве, повысить чувствительность преобразователя уровня. Исследовать погрешность измерения уровня, обусловленную нарушением эквипотенциальности поверхности электродов.

**Материалы и результаты исследований.** Преобразователь уровня состоит из двух цилиндрических электродов (рис. 1).

При заполнении резервуара до уровня  $h$  ёмкость преобразователя уровня определяется из уравнения [1]:

$$C = C_0 + \frac{\rho \epsilon_0 \epsilon (L-h)}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} + \frac{\rho \epsilon_0 \epsilon_{ж} h}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)}, \quad (1)$$

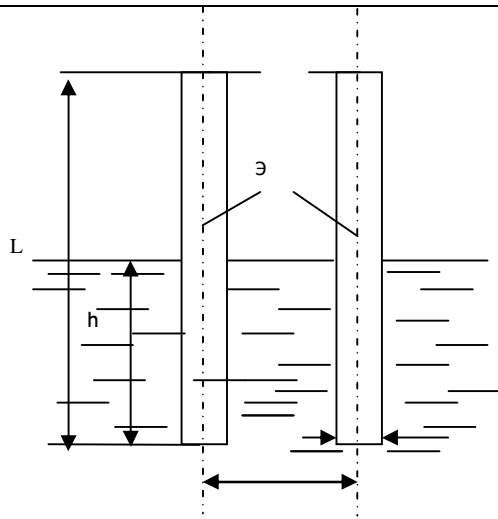


Рисунок 1 – Частично погруженные в жидкость электроды уровнемера

где  $L$  - полная длина электродов;  
 $d$  - расстояние между электродами;  
 $r$  - радиус электрода;  
 $C_0$  -емкость, обусловленная соединительными проводами от электродов до вторичной измерительной аппаратуры.

В (1) первые два слагаемых являются неинформативными, а информативным слагаемым является третье слагаемое.

Электрическое поле в межэлектродном пространстве является неоднородным, значительное влияние оказывает краевой эффект. Поэтому с целью увеличения чувствительности предлагается конструкция коаксиального преобразователя уровня (рис. 2).

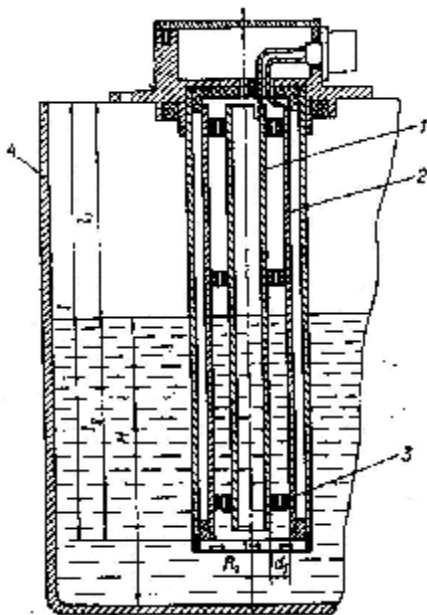


Рисунок 2 – Емкостный преобразователь уровня

Преобразователь состоит из внутреннего 1 и внешнего 2 цилиндрических электродов радиусами, соответственно  $R_1$  и  $R_2$ . Взаимное расстояние  $d$  между электродами фиксируется проходными изоляторами 3, резервуар 4, в котором измеряется уровень воды. Полная длина электродов может быть  $L = 0,9 - 10,0 м$ .

При заполнении резервуара до уровня  $H$  емкость определяется из выражения:

$$C = C_0 + \frac{2pe_0el_1}{\ln R_2 / R_1} + \frac{2pe_{жс}e_0l_2}{\ln R_2 / R_1} = C_0 + \frac{2pee_0(l-l_2)}{\ln(1+d/R_1)} + \frac{2pe_0e_{жс}l_2}{\ln(1+d/R_1)} \quad (2)$$

В (2) для  $C_0$  предусматривается схемная компенсация. Выразим  $l_1 = l - l_2$  и подставим в (2), получим выражение эквивалентной емкости:

$$C_{эkv} = \frac{2pee_0l}{\ln R_2 / R_1} + \frac{2pe_0(e_{жс} - e)l_2}{\ln R_2 / R_1} = \frac{2pe_0el}{\ln(1+d/R_1)} + \frac{2pe_0(e_{жс} - e)l_2}{\ln(1+d/R_1)} \quad (3)$$

При  $l_2 = var$  видим, что  $C = f(l_2)$ . Следовательно, используя дифференциальный преобразователь в мостовой измерительной цепи [2], получим  $C_{эkv} = f(l_2)$ .

Следует отметить, что в реальных условиях  $e_{жс}$  может изменяться от изменения температуры измеряемой жидкости и ее химического состава. С целью уменьшения влияния на результат измерения от изменения  $e_{жс}$  конструкция усложнена дополнительным компенсационным конденсатором 3, размещенным в нижней части электродов преобразователя, и постоянно находится в исследуемой жидкости, а его емкость зависит только от  $e_{жс}$  (рис. 3). При измерении уровня жидкости, емкость компенсационного электрода используется для коррекции выходного сигнала.

Пространство над измеряемой жидкости всегда будет загрязняться ее парами, изменяя диэлектрическую проницаемость воздуха. С целью уменьшения этого влияния в емкостном преобразователе используется второй компенсационный конденсатор 4 (рис. 3).

Измерение емкости выполняется на высоких частотах из предположения, что поверхность каждого электрода эквипотенциальна. Это не всегда так. При длинных электродах преобразователя,

высоких значениях диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости и повышенных рабочих частотах эквипотенциальность поверхности электродов преобразователя нарушается. Это приводит к погрешности измерения уровня. Исследуем эти погрешности.

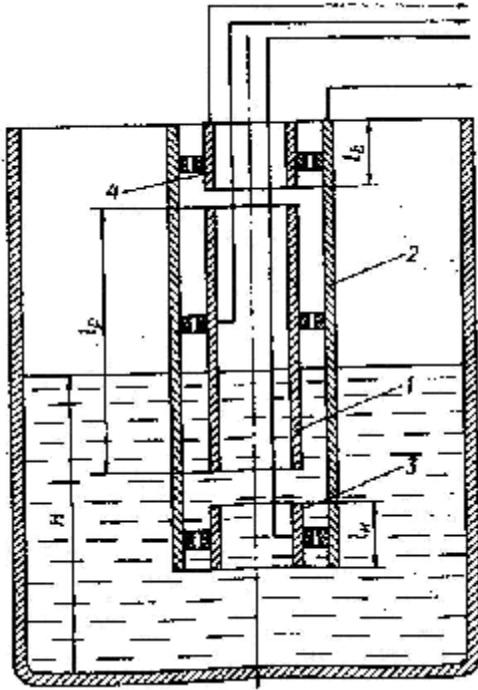


Рисунок 3 – Емкостной преобразователь уровня жидкости с компенсационными электродами

Нарушение эквипотенциальности обуславливается двумя факторами: падением напряжения на активном сопротивлении электродов и волновыми явлениями при распространении энергии вдоль электродов преобразователя.

Электроды преобразователя уровня всегда можно представить участком длинной линии с распределенными параметрами. Одним концом участок (электроды) подключен к измерительному устройству, а на другом – разомкнут. Длина волны выбирается всегда больше длины электродов преобразователя уровня. Если эти параметры соизмеримы, то начинают сказываться волновые явления. При постоянной рабочей частоте длина волны уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ж}$  жидкости. Следовательно, наибольшее влияние волновых процессов будет при полном погружении электродов в жидкость. Это наихудшее условие.

При условии, что 2 электрода – то реактивная проводимость (электродов) такой линии длиной  $L$  равна:

$$g = wC_{\vartheta} = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg} \frac{2pl}{l} \quad (4)$$

где  $C_{\vartheta}$  – эквивалентная межэлектродная емкость преобразователя с учетом влияния волнового процесса;

$$l = \frac{v}{f} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ж}} \cdot f} \text{ - длина волны;}$$

$v$  – скорость распространения волны вдоль линии;

$c$  – скорость света;

$w = 2\pi f$  – рабочая частота;

$$Z_0 = \frac{1}{vC_{01}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{ж}}}{cC_{01}} \text{ - волновое сопротивление}$$

линии;

$c_{01}$  – погонная емкость линии.

Разложим в формуле (4)  $\operatorname{tg} \frac{2pl}{l}$  в степенной ряд:

$$\operatorname{tg} \frac{2pl}{l} = \frac{2pl}{l} + \frac{1}{3} \left( \frac{2pl}{l} \right)^3 + \frac{2}{15} \left( \frac{2pl}{l} \right)^5 + \dots$$

С учетом  $L \ll l$ , при малой величине  $\frac{2pl}{l}$  члены ряда быстро убывают. Ограничимся первыми двумя слагаемыми

$$\operatorname{tg} \frac{2pl}{l} \approx \frac{2pl}{l} \left( 1 + \frac{4p^2 l^2}{3l^2} \right). \quad (5)$$

Погрешность принятого упрощения при  $\frac{2pl}{l} \leq 0,1$  составляет около  $10^{-5}$  и весьма мала.

Подставляя известные величины в (4), получим выражение для эквивалентной межэлектродной емкости преобразователя уровня:

$$C_{\vartheta} = C_{01} \cdot l \left( 1 + \frac{4p^2 l^2}{3l^2} \right). \quad (6)$$

В (6)  $C_{01} \cdot l$  представляет собой статистическую емкость  $C$ , второе слагаемое в скобках выражает относительную погрешность – отклонение эквивалентной емкости  $dC_{\vartheta}$  от статической:

$$dC_{\vartheta} = \frac{4p^2 l^2}{3l^2} = \frac{4p^2 \epsilon_{ж} l^2 t^2}{c^2} \quad (7)$$

Из (7) следует, что  $dC_{\vartheta}$  зависит от  $\epsilon_{ж}$  и частоты, которые в процессе работы могут изменяться. Желательно, чтобы погрешность  $dC_{\vartheta}$  была пренебрежимо мала. Этого можно достигнуть выбором частоты. Принимая величину допустимой максимальной погрешности  $dC_{\vartheta \max}$  из неравенства

$$dC_{\vartheta} \leq dC_{\vartheta \max} \quad (8)$$

получим условие выбора частоты  $f$ :

$$f \leq \frac{c}{2pl} \sqrt{\frac{3dC_{\vartheta \max}}{\epsilon_{ж}}}$$

После подстановки известных значений постоянных величин, получим:

$$f \leq \frac{83}{10^{-3} \cdot l} \sqrt{\frac{3dC_{\text{эmax}}}{e_{\text{ж}}}} \quad (9)$$

В (8) частота получается в килогерцах, если длина  $l$  электродов преобразователя выражена в метрах и погрешность  $dC_{\text{эmax}}$  в относительных величинах.

По (8) определим максимально допустимую частоту для емкостного уровнемера с длиной электродов 5 и 10 м,  $e_{\text{ж}} = 81$ ,  $dC_{\text{эmax}} = 10^{-3}$  (0,1%) :

$$f_{l=5} \leq \frac{83}{5l} \sqrt{\frac{10^{-3}}{81}} = 64 \text{кГц} ;$$

$$f_{l=10} \leq \frac{83}{5l} \sqrt{\frac{10^{-3}}{81}} = 32 \text{кГц} .$$

Получение соотношений справедливо для изолированных электродов преобразователя уровня. При наличии изоляционного покрытия электрода преобразователя стен диэлектрика с проводимостью  $e_{\text{из}}$  длина увеличится и рабочая частота при прочих равных условиях также возрастет.

Увеличение частоты вызывает неэквипотенциальность электродов преобразователя за счет уменьшения реактивного сопротивления  $x_p$  в межэлектродном пространстве, и это уменьшение может стать соизмеримым с активным сопротивлением электродов.

Оценим приблизительно погрешность от этой неэквипотенциальности. Для этого сравним максимально возможные активное и реактивное сопротивления электродов, опущенных в воду.

Влиянием неэквипотенциальности электродов можно пренебречь, если  $r_{\text{э}} \ll x_p$ . Практически для этого достаточно, чтобы выполнить условие

$$\frac{r_p}{x_p} \leq 10^{-3} . \quad (9)$$

Определим, при какой частоте соблюдается это соотношение для преобразователя уровня (рис. 1), представляющего собой параллельную линию из двух цилиндрических проводов радиусом  $r$ , расположенных на расстоянии  $d$  для преобразователя (рис. 2), результаты будут отличаться в меньшую сторону. Величина  $r_{\text{э}}$  в (9) равна удвоенному активному сопротивлению одного электрода радиусом  $r$  и длиной [4]:

$$r_{\text{э}} = \frac{2l r_{\text{э}}}{\pi r^2} ,$$

где  $r_{\text{э}}$  - удельное сопротивление материала электрода.

Реактивное сопротивление  $x_p$  электродов преобразователя:

$$x_p = \frac{1}{\omega C_{\text{max}}} = \frac{1}{2\pi f C_{\text{max}}} ,$$

где  $C_{\text{max}}$  - максимальная межэлектродная емкость преобразователя, равная

$$C_{\text{max}} = \frac{\pi \epsilon l}{\ln \left( \frac{d}{2r} + \sqrt{\frac{d^2}{4r^2} - 1} \right)} .$$

Полученные значения  $r_{\text{э}}$  и  $x_p$  подставляем в (9), получим условие, ограничивающее рабочую частоту емкостного преобразователя (рис. 3):

$$f = \frac{r^2 \ln \left( \frac{d}{2r} + \sqrt{\frac{d^2}{4r^2} - 1} \right)}{e_{\text{ж}} r_{\text{э}} l} . \quad (10)$$

В (10) частота получается в кГц, если  $r_{\text{э}}$  выражено в Ом·м .

Определяем согласно (10) верхнюю границу преобразователя (рис. 2) частоты для наихудшего случая. Принимаем  $\frac{r}{l} = 10^{-4}$  ( $l = 10\text{м}; r = 1\text{мм}$ ),

$\frac{d}{2r} = 10$ ,  $p_{\text{э}} = 1,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $e_{\text{ж}} = 81$ . При этих условиях  $f_{\text{max}} \leq 215 \text{кГц}$ . Если при расчетах учесть поверхностный эффект, то  $f_{\text{max}}$  получится в 2-3 раза меньше.

**Выводы.** На основании изложенного можно утверждать, что чувствительность преобразователя (рис. 3) более высокая, а для сохранения эквипотенциальности поверхности электродов преобразователя уровня рабочая частота не должна превышать ограниченную частоту согласно (10). При длине электродов до 5,5 м и  $e_{\text{ж}}$  возможно применение повышенной частоты до 100–150кГц. Работа на более высоких частотах будет вызывать значительные погрешности измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнитский Б.В., Смирнитская М.Б. Основы теории электротехники: Учебное пособие.- Алчевск: ДГМН, 2003. - 342 с.
2. Є.С. Поліщук. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 350 с.
3. Карандеев К.Б. Специальные методы электрических измерений. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963.
4. Новик А.И. О некоторых видах погрешностей емкостных уровнемеров// Сб. трудов НИИ Теплоприбора. - М., 1962. - №4.

Стаття надійшла 25.06.2008 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Мосьпаном В.О.