

ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.586.772

ПОГРЕШНОСТИ КОАКСИАЛЬНО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ЕМКОСТНЫХ УРОВНЕМЕРОВ

Ф.Б. Гриневич, акад. НАН України, **А.М. Саволюк**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

e-mail: melnik@ied.org.ua

Исследованы основные погрешности коаксиально-цилиндрических датчиков емкостных уровнемеров, получены также упрощенные соотношения для их расчета, приведена удобная таблица для практической оценки погрешностей. Библ. 11, таблица.

Ключевые слова: емкость, жидкость, уровень, погрешность.

Большинство известных уровнемеров построено на основе емкостного метода измерения [1-7], основанного на зависимости электрической емкости датчика от измеряемого уровня. Емкостные датчики получили широкое распространение благодаря простоте конструкции, простоте схем вторичной измерительной аппаратуры, высокой прочности и надежности, возможности работы при больших перепадах давлений и температур. Рассмотрим наиболее существенные погрешности датчиков и вторичной аппаратуры.

Разработанные и широко используемые принципы построения емкостных самокомпенсированных уровнемеров [3] обеспечивают независимость их показаний от изменений диэлектрических проницаемостей контролируемых сред: верхней (газовой) и нижней (обычно жидкой).

Во многих случаях (например, при секционировании датчиков) с увеличением диапазона контролируемых уровней будут увеличиваться и погрешности их измерения. Актуальной была и остается задача получения простых приближенных выражений для расчета этих погрешностей.

Первая группа – это погрешности, возникающие из-за неточностей установки сосуда и монтажа датчика в нем. Пусть сосуд установлен с угловым отклонением φ_1 от вертикали, а направление измерения (ось) датчика составляет с осью сосуда угол φ_2 , установочная поверхность датчика смещена на величину ΔH_0 от номинального положения, датчик смещен на установочной поверхности от оси симметрии сосуда на величину L . Суммарная величина возникающей в этом случае относительной погрешности определяется по формуле [7]

$$\delta_{\text{уст}} = \left(1 - \frac{h}{H}\right)(\cos \varphi_2 - 1) + L \frac{\sin \varphi_1}{H} + \frac{\Delta H_0}{H}, \quad (1)$$

где H – высота сосуда; h – уровень жидкости (контролируемой среды) в сосуде.

Другая группа – это погрешности изготовления датчиков, вызванные несовершенством технологии и инструментов. Среди основных наиболее часто встречающихся необходимо выделить технологические погрешности, возникающие из-за следующих причин:

- параллельное взаимное смещение осей цилиндров-электродов;
- наклон осей цилиндров-электродов;
- эллиптичность поперечного сечения электродов;
- конусность электродов;
- отклонение радиальных и линейных размеров датчика от номинальных.

Отдельную группу представляют погрешности от взаимодействия измерительных преобразователей с контролируемой средой. Принцип действия емкостных датчиков уровня основан на изменении емкости воздушного конденсатора за счет вытеснения воздуха жидкостью из рабочего зазора. При этом происходит взаимодействие жидкости, уровень которой измеряется, с электродами датчиков. Из-за малого рабочего зазора, который необходим для обеспечения высокой чувствительности, в процессе измерения уровня происходят смещение H_{cm} уровня в зазоре датчика относительно уровня в сосуде и искривление поверхности жидкости (мениск): $H_{\Sigma} \approx H_{cm} + H_m$.

Процесс измерения уровня можно представить в виде двух операций – преобразование уровня в сосуде в уровень среды в рабочем зазоре датчика и преобразование уровня в рабочем зазоре датчика в электрическую емкость.

Пусть R и r соответственно внутренний радиус внешнего и внешний радиус внутреннего цилиндров-электродов датчика. Тогда емкость коаксиально-цилиндрического датчика может быть представлена выражением

$$C_{\partial} = 2\pi\varepsilon \frac{H}{\ln \frac{R}{r}}, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится датчик.

Отклонения H , R и r от номинальных значений приводят к изменению емкости датчика, которое нетрудно определить как полный дифференциал предыдущего выражения:

$$\delta_p = \delta_H + \frac{1}{\ln \frac{R}{r}} (\delta_R - \delta_r), \quad (3)$$

где δ – относительные приращения емкости датчика за счет отклонений от номинальных значений его линейных (H) и радиальных (R и r) размеров.

Представим датчик, погруженный в среду с диэлектрической проницаемостью ε на глубину h , как параллельное соединение двух коаксиально-цилиндрических конденсаторов с длинами соответственно h и $H-h$. Тогда выражение для емкости датчика запишем в виде $C_{\partial} = C_h + C_{H-h}$, где C_h – емкость погруженной в среду части датчика; C_{H-h} – емкость части, находящейся в газовой среде.

На основании выражения для емкости коаксиально-цилиндрического конденсатора имеем

$$C_h = \frac{2\pi\varepsilon_c h}{\ln \frac{R}{r}} (1 + \delta_{Ch}) = A\varepsilon_c \frac{h}{H} (1 + \delta_{Ch}); \quad (4)$$

$$C_{H-h} = \frac{2\pi\varepsilon_r (H-h)}{\ln \frac{R}{r}} (1 + \delta_{C(H-h)}) = A\varepsilon_r (1 - \frac{h}{H}) (1 + \delta_{C(H-h)}), \quad (5)$$

где $A = \frac{2\pi H}{\ln \frac{R}{r}}$ – некоторый коэффициент; δ_{Ch} , $\delta_{C(H-h)}$ – относительные отклонения емкостей датчиков, обусловленные технологическими погрешностями изготовления.

В работе [9] получено выражение для расчета погрешности из-за параллельного взаимного смещения осей внешнего и внутреннего цилиндров-электродов

$$\delta_m \approx 0,5 \left(\frac{m}{d} \right)^2, \quad (6)$$

где m – геометрическое смещение осей; $d = R - r$ – электрический зазор между электродами.

Получим выражение для расчета погрешности измерения уровня, к которой приводит указанная технологическая погрешность:

$$\delta_{hm} \approx \frac{\frac{2\pi}{R} * 0,5 \left(\frac{m}{d}\right)^2 (\varepsilon_r H + \Delta\varepsilon h)}{\frac{2\pi\Delta\varepsilon H}{\ln \frac{R}{r}}} = 0,5 \left(\frac{m}{d}\right)^2 \left[\varepsilon_r / \Delta\varepsilon + h/H \right] = \delta_m \left(\varepsilon_r / \Delta\varepsilon + y \right), \quad (7)$$

где $y = \frac{h}{H}$ – степень заполнения датчика; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_r$ – разность диэлектрических проницаемостей контролируемой среды и газа.

Аналогичные выражения можно получить и для погрешностей от изменения радиальных размеров и эллиптичности поперечного сечения электродов [10]. При наличии всех трех указанных составляющих суммарная погрешность $\delta_{h\Sigma} = \delta_\Sigma \left(\varepsilon_r / \Delta\varepsilon + y \right)$, где $\delta_\Sigma = \delta_m + \delta_{R,r} + \delta_B$ – суммарная технологическая погрешность.

Технологическая погрешность от эллиптичности электродов может быть определена по приближенной формуле [10]

$$\delta_B \approx \frac{\gamma_R - \gamma_r}{2d/r + \gamma_R - \gamma_r} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\gamma_R - \gamma_r}{2d} r}, \quad (8)$$

где $\gamma_R = \frac{\Delta_R - \Delta_R^1}{R}$; $\gamma_r = \frac{\Delta_r - \Delta_r^1}{R}$; $\Delta_R = B_1 - R$; $\Delta_R^1 = R - b_1$; $\Delta_r = B_2 - r$; $\Delta_r^1 = r - b_2$ – величины, характеризующие отклонения поперечных сечений от круговых с радиусами R и r ; B_1, B_2, b_1, b_2 – большие и малые полуоси эллипсов внутреннего и внешнего цилиндров.

Погрешность от конусности электродов датчика рассмотрена в [10]. Величина этой погрешности может быть определена по приближенному выражению

$$\delta_\beta \approx \frac{\beta_1 - \frac{r}{R} \beta_2}{2d} H = \frac{R\beta_1 - r\beta_2}{2Rd} H, \quad (9)$$

где β_1, β_2 – углы конусности внешнего и внутреннего электродов соответственно.

Опуская выкладки, аналогичные описанным выше, приведем выражение для погрешности измерения уровня, вызванной конусностью электродов:

$$\delta_{h\beta} \approx \delta_\beta \left(\varepsilon_r / \Delta\varepsilon + y^2 \right). \quad (10)$$

Получим также приближенное выражение для относительного приращения емкости коаксиально-цилиндрического датчика уровня за счет наклона осей цилиндров [10]

$$\delta_\alpha \approx \frac{1}{12} \frac{(H\alpha)^2}{(R^2 - r^2) \ln R/r} \approx \frac{1}{12} \frac{(H\alpha)^2 r}{(R+r)d^2}, \quad (11)$$

где α – угол между осями цилиндров-электродов.

По аналогии с соотношениями (7) и (10) нетрудно получить выражение и для погрешности измерения уровня в случае наклона осей цилиндров-электродов:

$$\delta_{h\beta} \approx \delta_\beta \left(\varepsilon_r / \Delta\varepsilon + y^3 \right). \quad (12)$$

Суммарную погрешность из-за влияния капиллярных явлений в датчике, с учетом данных, приведенных в [11], можно представить в упрощенном виде:

$$H_\Sigma \approx \frac{2\sigma \cos\Theta}{\rho g d} + H_m, \quad (13)$$

Источник погрешности	Характеристический параметр	Погрешность датчика										Выражения для отклонения емкости
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Параллельное смещение осей	$(m/d), \%$	1,47	6,32	7,75	8,9	10	10,9	11,8	12,6	13,4	14,1	$\delta_m \approx 0,5 \left(\frac{m}{d} \right)^2$
Разброс радиальных размеров	$(\delta_R - \delta_r) * 10^{-2}, \%$	0,62	1,24	1,86	2,48	3,1	3,72	4,34	4,96	5,58	6,2	$(\delta_R - \delta_r) / \ln R/r$
Эллиптичность электродов	$(\gamma_R - \gamma_r) * 10^{-1}$	0,2	0,36	0,51	0,63	0,73	0,83	0,91	0,97	1,04	1,1	$\delta_B \approx (\gamma_R - \gamma_r) / \left(\frac{2d}{r} + \gamma_R - \gamma_r \right)$
Разброс линейных размеров	$(\delta_H), \%$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	δ_H
Конусность электродов	$\left(\beta_1 - \frac{r}{R} \beta_2 \right), \text{ мин}$	0,03	0,06	0,1	0,13	0,16	0,19	0,21	0,25	0,27	0,3	$\delta_\beta \approx \frac{R\beta_1 - r\beta_2}{2Rd} H$
Наклон осей электродов	$(\alpha), \text{ мин}$	1,3	1,8	2,1	2,5	2,9	3,2	3,4	3,6	3,8	4	$\delta_\alpha \approx \frac{1}{12} \frac{(H\alpha)^2 r}{(R+r)d^2}$
$(H_\Sigma), \text{ мм}$												
Капиллярные свойства воды	(d), мм	15	7,5	5	4	3	2,7	2,2	1,8	1,7	1,5	$H_\Sigma \approx \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g d} + H_m$
Капиллярные свойства керосина	(d), мм	7,5	3,3	2,5	2,0	1,5	1,4	1,3	1,1	0,9	0,7	
Капиллярные свойства жидкого азота	(d), мм	2,85	1,25	0,95	0,75	0,55	0,5					

где Θ, ρ, σ, g – соответственно угол смачивания, плотность жидкости, коэффициент поверхностного натяжения жидкости и ускорение свободного падения.

Произведём приближенные расчеты согласно приведенным выше соотношениям. В представленной таблице сведены выражения для относительных отклонений емкостей датчика, вызванных различными технологическими погрешностями. Для каждой погрешности назван определенный параметр, вызывающий ее появление (характеристический параметр). В соответствующих клетках таблицы приведены значения допусков на характеристические параметры для заданных элементарных приращений емкости: 0,1; 0,2; 0,3;... 1,0 %. Из анализа данных таблицы следует, что влияние параллельного смещения осей цилиндров на 4 % от зазора на изменение емкости датчика эквивалентно наклону осей цилиндров на 1,3 мин. Довольно жесткими должны быть допуски на конусность электродов, поскольку угол конусности в 0,3 мин может привести к отклонению емкости на 1 %. Незначительные отклонения радиальных размеров вызывают существенные отклонения емкости датчиков, поэтому допуски на них, а также на эллиптичность электродов должны быть в 5...10 раз меньшими, чем допускаемое отклонение емкости датчика от номинального значения. Большие погрешности могут также вызывать капиллярные явления. Из данных таблицы видно, что, например, для воды при зазоре датчика в 1,5 мм погрешность достигает 1 мм (абсолютное значение). Для керосина погрешность примерно вдвое меньше. При зазоре в 3 мм погрешность также вдвое меньше. Для уменьшения погрешности используются датчики с несколькими конденсаторами, соединенными параллельно. Так, например, при использовании датчика, состоящего из трех электродов (при этом внутренний и наружный электроды электрически соединены, что эквивалентно параллельному включению двух двухэлектродных датчиков), рабочий зазор между ними можно увеличить вдвое при сохранении той же чувствительности датчика. Однако при этом конструкция датчика усложняется, соответственно увеличиваются его стоимость и габариты.

Удобство предлагаемой таблицы в том, что здесь можно задать общую относительную погрешность датчика (0,1; 0,2; 0,3;... 1,0 %) и определить, какие должны быть при этом допустимые геометрические отклонения формы изделия (т.е. можно отбирать датчики для различных случаев применения). Здесь также приведены погрешности от капиллярных явлений (абсолютная погрешность). Величины получены суммированием погрешностей $H_{см}$ и H_m , которые являются данными таблиц 1 и 2 [11]. Здесь же все сведено в одной таблице, чтобы не искать разные таблицы.

1. Ершов М.Н. Методы измерения уровня жидких продуктов: теория и практика. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2010. Вып. № 4-1. С. 9–14
2. Вильнина А.В., Вильнин А.Д., Ефремов Е.В. Современные методы и средства измерения уровня в химической промышленности. Изд-во Томского политехнического университета. 2011. 84 с.
3. Карандеев К.Б., Гриневиц Ф.Б., Новик А.И. Емкостные самокомпенсированные уровнемеры. Москва–Ленинград: Энергия, 1966. 135 с.
4. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. Москва: Техносфера. 2006. 588 с.
5. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. Москва: Изд-во стандартов, 1990. 287 с.
6. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: пер. с англ. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
7. Бобровников Г.Н., Катков А.Г. Методы измерения уровня. Москва: Машиностроение, 1977. 168 с.
8. Гриневиц Ф.Б., Левицкий А.С., Конопко В.И. Влияние перекоса электродов цилиндрического первичного преобразователя (датчика) на точность измерения перемещений. *Техническая электродинамика*. 1979. № 2. С. 83–85.
9. Гриневиц Ф.Б., Левицкий А.С., Конопко В.И. Расчет погрешности емкостного цилиндрического первичного преобразователя (датчика) перемещений, вызванной параллельным взаимным смещением осей цилиндров-электродов. *Техническая электродинамика*. 1979. № 1. С. 88–91.
10. Монастырский З.Я., Саволук А.М. Компенсация влияния на точность измерения технологических погрешностей коаксиально-цилиндрических емкостных датчиков уровня. *Техническая электродинамика*. 1986. № 1. С. 94–101.
11. Саволук А.М. Погрешности от взаимодействия емкостных измерительных датчиков уровня с контролируемой средой. *Техническая электродинамика*. 1992. № 5. С. 100–107.

УДК 681.586.772

Ф.Б. Гриневич акад. НАН України, **О.М. Саволук**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Похибки коаксіально-циліндричних давачів емнісних рівнемірів

Досліджено похибки коаксіально-циліндричних давачів емнісних рівнемірів, наведено також спрощені співвідношення для їх розрахунків та таблицю для практичної оцінки похибок. Бібл. 11, таблиця.

Ключові слова: емність, рідина, рівень, похибка.

F.B. Grynevych, **A.M. Savoluk**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Errors of coaxial-cylindrical transducers for capacitance levelmeters

The questions of accuracy of coaxial-cylindrical level sensors are considered, simplified expression, table for practical assessment of parameters and value errors are obtained. References 11, table.

Key words: capacitance, liquid, level, error.

Надійшла 28.12.2017

Received 28.12.2017

УДК 621.317

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ВИБІР ОПТИЧНИХ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЗАЗОРІВ У ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ

І.О. Брагинець, канд. техн. наук, **О.Г. Кононенко**, канд. техн. наук, **Ю.О. Масюренко**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: masjuriy@ied.org.ua

Проведено аналіз відомих оптичних лазерних систем (ОЛС) для вимірювання лінійних розмірів та переміщень механічних об'єктів з метою їх застосування для визначення повітряних зазорів потужних гідрогенераторів. Встановлено фактори, які брались до уваги при розгляді вказаних ОЛС. Відмічено властивості конструкції гідрогенераторів і вимоги до точності та часу однократного вимірювання повітряного зазору. Розглянуто основні методи вимірювання відстані, на яких базуються ОЛС, і визначено переваги та недоліки кожного з них. Вказано на доцільність використання волоконно-оптичних ліній для передачі та прийому лазерного випромінювання. На основі результатів досліджень вироблено рекомендації по застосуванню ОЛС. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: повітряний зазор, гідрогенератор, лазер, фазовий зсув, частотна модуляція.

Для визначення геометричних параметрів об'єктів, що обертаються або нагріваються до високої температури, а також об'єктів, конструкція яких ускладнює встановлення відповідних сенсорів для їх контролю, застосовуються оптичні методи вимірювання відстані. Авторами проведено огляд та аналіз оптичних лазерних систем (ОЛС) для вимірювання лінійних розмірів та переміщень механічних об'єктів різного призначення з метою діагностики їх стану. Серед останніх особливу увагу було приділено системам для безконтактного контролю повітряних зазорів у електричних машинах, а саме в гідрогенераторах. Повітряний зазор між ротором і статором є одним з найважливіших параметрів гідрогенератора. Розмір повітряного зазору значною мірою визначає характеристики генератора і його поведінку в процесі експлуатації [1]. Відхилення повітряного зазору від номінального значення може призвести до погіршення характеристик гідрогенератора, а також до аварійних ситуацій та руйнування генератора. Тому вдосконалення методів високоточної безконтактної діагностики геометричних параметрів гідрогенератора є і зараз актуальною науково-технічною проблемою.