РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ ЖИДКИХ СРЕД ЕМКОСТНЫМИ УРОВНЕМЕРАМИ

Матякубова Парахат Майлиевна
Заведующий кафедрой «Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация» Ташкентского государственного технического университета, д.т.н., профессор
E-mail: tgtu_mss@rambler.ru
ORCID: 0000-0003-3352-6335

Муминов Холмуроджон Дилшоджон угли
Докторант кафедры «Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация» Ташкентского государственного технического университета
E-mail: xolmurodmominov2@gmail.com
ORCID: 0009-0003-2116-8128

Назарбаева Барно Асатовна
Доцент кафедры «Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация» Ташкентского государственного технического университета
E-mail: barno786@mail.ru
ORCID: 0009-0001-6839-446X

Аннотация. В настоящей статье рассматривается применение емкостных уровнемеров для измерения и контроля уровня жидкостей. Изучены их конструкция, область применения, принцип действия, а также классы точности. Кроме того, были проанализированы процессы использования емкостных уровнемеров в промышленных отраслях и их метрологическая поверка в лабораторных условиях.

Ключевые слова: емкостные уровнемеры, уровень, первичный преобразователь, классы точности, жидкость, резервуар.

Annotatsiya. Ushbu maqolada suyuqlik sathini o‘lchash va nazorat qilish uchun sig‘imli sath o‘lchagichlarning qo‘llanilishi ko‘rib chiqiladi. Ularning konstruksiyasi, qo‘llanilish sohasi, ishlash prinsipi hamda aniqlik sinflari o‘rganilgan. Bundan tashqari, sanoat tarmoqlarida sig‘imli sath o‘lchagichlardan foydalanish va ularni laboratoriya sharoitida metrologik qiyoslash jarayonlari tahlil qilindi.

Kalit so‘zlar: sig‘imli sath o‘lchagichlar, sath, birlamchi o‘zgartgich, aniqlik sinflari, suyuqlik, rezervuar.

Abstract. This article examines the application of capacitive level gauges for measuring and monitoring fluid levels. Their design, application area, operating principle, and accuracy classes have been studied. Additionally, the processes of using capacitive level gauges in industrial sectors and their metrological verification under laboratory conditions were analyzed.

Keywords: capacitive level gauges, level, primary converter, accuracy classes, liquid, reservoir.

ВВЕДЕНИЕ.

Приборы для измерения уровня находят широкое применение при автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности, водного и коммунального хозяйства. Они имеют разные принципы действия, конструктивное исполнение и условия эксплуатации, что необходимо учитывать при их выборе для автоматизации конкретного технологического процесса.

Измерение и контроль уровня жидкостей необходимы в тех случаях, когда поддержание его на некотором заданном значении связано с безопасностью работы технологического оборудования, например, уровень воды в барабане парового котла, а также для определения количества жидкости в различных резервуарах и баках [1].

Технические средства, применяемые для измерения уровня жидкости, называются уровнемерами. Приборы, предназначенные для сигнализации предельных уровней жидкости, называются сигнализаторами уровня.

Уровнемеры, предназначенные для измерения и регулирования уровня жидкости снабжены двусторонней шкалой, которая градуируется в сантиметрах, а для приборов, применяемых для измерения уровня воды в барабане котлов - в миллиметрах. Уровнемеры, служащие для измерения количества жидкости в резервуарах и баках, имеют одностороннюю шкалу, а приборы, применяемые для измерения уровня и поддержания его в заданных пределах, снабжены устройством сигнализации предельных отклонении уровня от заданных пределов [2].

В зависимости от требований, предъявляемых к объектам измерения, применяются различные методы измерения уровня. Для дистанционного измерения уровня жидкостей, находящихся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением применяют метод измерения по разности давлений с помощью дифманометров, а также методы контроля с помощью поплавка (буйка), ультразвуковой, емкостной и другие методы.

Уровнемер емкостный обеспечивает измерение текущего уровня и сигнализацию двух перестраиваемых предельных уровней воды, молока, пива, щелочи, кислот, нефти и нефтепродуктов, зерна и продуктов его размола, сахара, цемента, песка, извести, а также других жидких и сыпучих сред, в том числе в емкостях, находящихся под избыточным давлением.

ISSN 3030-3907

Работа таких уровнемеров основана на различии диэлектрической проницаемости жидкостей и воздуха. Простейший первичный преобразователь емкостного прибора представляет собой электрод (металлический стержень или провод), расположенный в вертикальной металлической трубке. Стержень вместе с трубой образуют конденсатор. Емкость такого конденсатора зависит от уровня жидкости, так как при его изменении от нуля до максимума диэлектрическая проницаемость будет изменяться от диэлектрической проницаемости воздуха до диэлектрической проницаемости жидкости [2, 3].

Емкостной метод обеспечивает хорошую точность порядка 1,5 %, имеет те же ограничения, что и поплавковый – среда не должна налипать и образовывать отложения на чувствительном элементе. Емкостные датчики широко распространены и используются для определения наличия рабочей среды: как жидкой, так и сыпучей (порошки, цемент, гранулированные продукты), как электропроводной, так и неэлектропроводной. Характерным принципиальным ограничением для емкостного метода является – однородность среды, среда должна быть однородной, по крайней мере, в зоне расположения сенсорного элемента [4, 5].

Некоторые емкостные датчики обеспечивают считывание через стенку неметаллического резервуара, что позволяет определять положение уровня без проникновения в резервуар или без контакта с продуктом. Датчик можно установить на плоской стенке резервуара или навить вокруг неметаллической трубы.

Первичный преобразователь емкостного уровнемера представляет собой конденсатор, обкладки которого погружены в среду. Он может быть выполнен в виде двух концентрических труб, пространство между которыми заполняется средой, либо в виде стержня, при этом роль второй обкладки играет металлическая стенка емкости. В случае проводящей жидкости сенсорный элемент покрывается изолятором, обычно фторопластом.

Принцип действия емкостных уровнемеров основан на различии диэлектрической проницаемости контролируемой среды (водных растворов солей, кислот, щелочей) и диэлектрической проницаемости воздуха либо водяных паров. Емкостные датчики отличаются большим разнообразием конструктивных исполнений для конкретных применений, могут быть стержневого, трубчатого типов, гибкие, тросовые и т.п. При выборе типа датчика должны учитываться в первую очередь, как состав контролируемой среды, так и ее диэлектрические свойства. Для датчиков, работающих в проводящей среде, необходимо выбирать конструкцию с изолированным электродом [6].

ISSN 3030-3907

Достоинства емкостных датчиков уровня следующие:

– быстродействие;
– простота;
– малая масса;
– высокая чувствительность;
– отсутствии механических подвижных инерционных частей;
– электроды с фторопластовым покрытием обеспечивают возможность их применения в агрессивных средах.

Недостатки:

– высокая чувствительность к изменению электрических свойств жидкостей, обусловленных изменением их состава, температуры и т.п.;
– образование на элементах датчика электропроводящей или непроводящей пленки вследствие химической активности жидкости, конденсации ее паров, налипания самой жидкости на контактирующие в ней элементы и т.п.

Емкостные уровнемеры могут быть использованы для измерения уровня жидкостей, находящихся под давлением до 2,5 - 6,0 МПа и с температурой от -40 до +200 ^{0}C, что обусловлено надежностью применяемой изоляции в изготовлении общепромышленных первичных преобразователей.

Емкостные уровнемеры не используются для измерения уровня вязких (более 0,980 Па·с), пленкообразующих, кристаллизующихся жидкостей, а также взрывоопасных веществ.

Действие емкостных уровнемеров основано на пропорциональном изменении электрической емкости первичного преобразователя, при изменении контролируемого уровня жидкости в резервуаре. Первичный преобразователь, преобразующий изменение уровня жидкости в пропорциональное изменение емкости, представляет собой, например, цилиндрический конденсатор, электроды которого расположены коаксиально. Емкость первичного преобразователя определяется как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов, один из которых образован частью электродов преобразователя и жидкостью, уровень которой измеряется, а второй - остальной частью электродов преобразователя и воздухом или парами жидкости [8].

Емкость первичного преобразователя таких уровнемеров функционально связана с диэлектрической проницаемостью веществ. Поэтому при измерении уровня жидкости емкостным уровнемером следует учитывать изменение диэлектрической проницаемости жидкости с изменением ее температуры.

ISSN 3030-3907

В зависимости от электрических характеристик жидкости их разделяют на неэлектропроводные и электропроводные. Жидкости, имеющие удельное сопротивление

$\rho > (10^7 \div 10^8)$ Ом·м и относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_ж \leq (5 \div 6)$, относятся к группе неэлектропроводных, а жидкости, имеющие $\rho \leq (10^5 \div 10^6)$ Ом·м и $\varepsilon_ж \geq (7 \div 10)$, относятся к группе электропроводных. Здесь необходимо отметить, что удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость жидкостей зависят от частоты напряжения, которое подводится к измерительному преобразователю. Вследствие различия электрических характеристик жидкостей емкостные преобразователи уровнемеров выполняются различным образом. Так, электроды преобразователей для неэлектропроводных жидкостей не изолируют, а для электропроводных жидкостей они покрываются электрической изоляцией [7, 8].

Некоторые типы емкостных уровнемеров могут применяться для сигнализации и дистанционного измерения уровня сыпучих тел с постоянной влажностью.

Рассмотрим на примере работу емкостного преобразователя для неэлектропроводных жидкостей (рис. 1) емкостного уровнемера, выполненного в виде цилиндрического конденсатора из двух коаксиальных труб 2 и 3, размещенных в резервуаре 1.

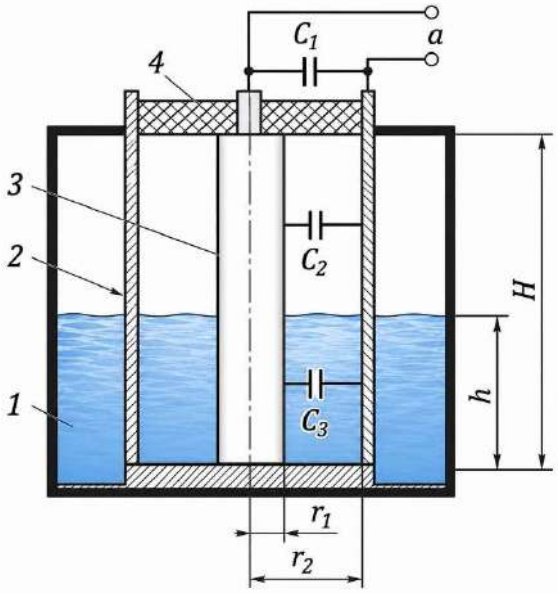


Рис. 1. Схема емкостного преобразователя для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей

Емкость преобразователя C_{oa}, измеренная на зажимах a, когда между электродами 2 и 3 на рабочем их участке высотой H находится воздух, определяется выражением:

ISSN 3030-3907

$$C_{па} = C_1 + C_{оп}, \quad (1)$$

где, C_1 - емкость проходного изолятора 4;

$C_{оп}$ – начальная емкость датчика

Начальная емкость датчика определяется согласно формуле:

$$C_{оп} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot H}{\ln (r_2/r_1)}, \quad (2)$$

где, ε_0 - диэлектрическая проницаемость свободного пространства, Ф/м; r_1 и r_2 – радиусы электродов, м.

Если конденсатор преобразователя заполнен измеряемой жидкостью на высоту h, а на участке H-h находятся воздух и пары этой жидкости, то емкость датчика определяется суммой емкостей соответствующих участков:

$$C_{па} = C_1 + C_2 + C_3, \quad (3)$$

В котором

$$C_2 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot (H-h)}{\ln (r_2/r_1)}, \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_ж \cdot h}{\ln (r_2/r_1)}, \quad (5)$$

где, ε_2 – диэлектрическая проницаемость воздуха и паров жидкости, Ф/м;

$\varepsilon_ж$ - диэлектрическая проницаемость жидкости, Ф/м.

Тогда с учетом выражения (2) и того, что $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_0 \approx 1$, емкость преобразователя уровнемера выразится следующим уравнением:

$$C_{па} = C_{оп} \cdot [1+(\varepsilon_ж - 1) \cdot \frac{h}{H}] \quad (6)$$

Для того, чтобы учесть изменения диэлектрической проницаемости неэлектропроводной жидкости $\varepsilon_ж$ при измерениях, в состав емкостного преобразователя уровнемера должна быть включена компенсационная емкость (компенсационная часть), постоянно заполненная контролируемой жидкостью. При работе же уровнемера в электропроводящих жидкостях емкостные элементы преобразователя покрываются фторопластовой изоляцией, а вместо компенсационной части к преобразователю подключают добавочную электрическую емкость.

ISSN 3030-3907



Рис. 2. Пример установки емкостного уровнемера, производитель Nivelco, Венгрия

Некоторые емкостные датчики обеспечивают считывание через стенку неметаллического резервуара, что позволяет определять положение уровня без проникновения в резервуар или без контакта с продуктом. Датчик можно установить на плоской стенке резервуара или навить вокруг неметаллической трубы.

Чувствительный элемент (ЧЭ) емкостного уровнемера представляет собой конденсатор, обкладки которого погружены в среду. Он может быть выполнен в виде двух концентрических труб, пространство между которыми заполняется средой, либо в виде стержня, при этом роль второй обкладки играет металлическая стенка емкости. В случае проводящей жидкости ЧЭ покрывается изолятором, обычно фторопластом. Когда зонд находится в воздухе (1), измеряется некоторая низкая начальная емкость CA (рис. 3) [3, 4]. Изменение уровня жидкости приводит к изменению емкости ЧЭ до значения CE (2, 3), преобразуемой в выходной электрический сигнал постоянного тока 4–20 мА.

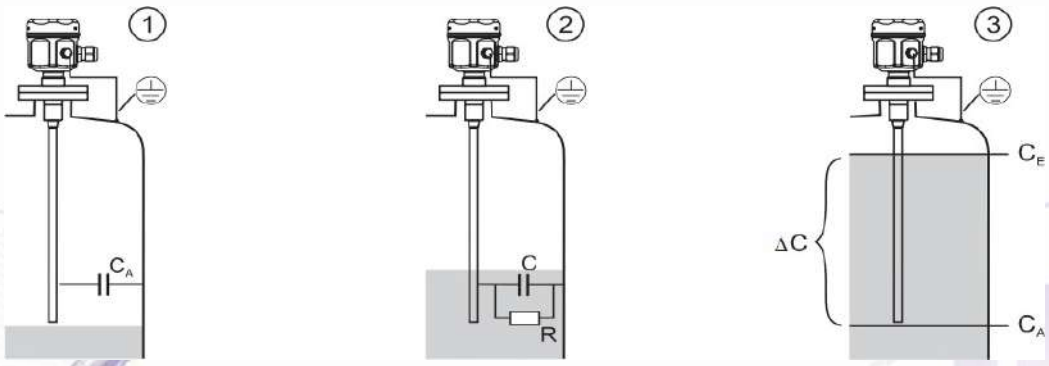


Рис. 3. Принцип действия емкостного уровнемера: R – проводимость жидкости; C – электрическая емкость жидкости; CA – начальная емкость; CE – конечная емкость (зонд полностью погружен); ΔC – изменение емкости

ISSN 3030-3907

Емкостные датчики отличаются большим разнообразием конструктивных исполнений для конкретных применений, могут быть стержневого, трубчатого типов, гибкие, тросовые и т. п. При выборе типа датчика должны учитываться в первую очередь, как состав контролируемой среды, так и ее диэлектрические свойства. Для датчиков, работающих в проводящей среде, необходимо выбирать конструкцию с изолированным электродом.

Классы точности емкостных уровнемеров зависят от верхнего предела измеряемого уровня. Точность измерения уровня от верхнего предела измерения H_{max} емкостных уровнемеров приведена в таблице 1.

Таблица 1.

Классы точности емкостных уровнемеров

H_{ma},	Классы точности				H_{max},	Классы точности				H_{max},	Классы точности			
м	0,5	1,0	1,5	2,5	м	0,5	1,0	1,5	2,5	м	0,5	1,0	1,5	2,5
0,4	-	-	+	+	2,5	+	+	+	+	1,0	+	+	+	+
0,6	-	-	+	+	4,0	+	+	+	+	16	-	+	+	+
1,0	+	+	+	+	6,0	+	+	+	+	20	-	+	+	+
1,6	+	+	+	+										

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Ёмкостные уровнемеры являются эффективными средствами измерения и контроля уровня жидкостей в автоматизированных технологических процессах. Их работа основана на изменении электрической ёмкости первичного преобразователя в зависимости от уровня контролируемой среды. Установлено, что точность измерений определяется диэлектрической проницаемостью и удельным электрическим сопротивлением жидкости, а также их зависимостью от температуры. Для повышения стабильности измерений целесообразно применять компенсационные элементы и учитывать электрические свойства контролируемой среды при выборе конструкции преобразователя. Правильный выбор типа уровнемера и условий его эксплуатации обеспечивает повышение достоверности измерений и надёжности автоматизированных систем контроля уровня.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Kulkarni, R. N. Karekar and R. C. Aiyer, “Liquid level sensor,” Review of Scientific Instruments, vol. 76, 10, 2005.

2. Матякубова П.М., Махмуджонов М.М., Саидорипов Л.Ф., Мўминов Х.Д. Классификация методов измерения и контроля уровня жидких сред.

ISSN 3030-3907

ИННОВАЦИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ ТОМ 6, НОМЕР 3 ТАШКЕНТ-2025.

3. Matyakubova P.M., Mahmudjonov M.M., Mo‘minov X.D. Development of an installation for checking and calibration of level gauges. НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ - СПЕЦ. ВЫПУСК № 7. ФГТУ. 2026.

4. Mahmudjonov M.M., Mo‘minov X.D. Sath o‘lchash usullarining klassifikatsiyasi va ularni tahlil qilish. “Milliy standart” Ilmiy-texnik jurnali 2025 / 2-son.

5. Matyakubova P.M., Jumanazarov A.R., Saidoripov L.F., Mo’minov X.D. Sath o‘lchagichlarni zamonaviy usullar yordamida qiyoslash. DGU 54373. Dasturiy mahsulotlar davlat reyestri 2025 y.

6. Matyakubova P.M., Jumanazarov A.R., Saidoripov L.F., Mo’minov X.D. Yangi avlod etaloni – Xalqaro standartlar asosida aniqlikni ta’minlovchi innovatsion yechim. «O‘zbekiston metrologiyasi» Ilmiy-texnik jurnali 2025 / 4-son.

7. Matyakubova P.M., To‘rayev Sh.A., Saidoripov L.F. Ishlab chiqarishning metrologik ta’minoti. Darslik: – Toshkent: “Fan va texnologiyalar nashriyot batbaa uyi”, 2025, 312 b.

8. Matyakubova P.M., Mo’minov X.D., Toxirov N.A. Sath o‘lchash jarayonida noaniqlikni baholash. DGU 46378. Dasturiy mahsulotlar davlat reyestri 2024 y.

ISSN 3030-3907