

УДК 629.735.054

**РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ
ТРУБНОГО ЕМКОСТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ**

С.Д. Тарасенко

Украинский государственный университет пищевых технологий, г. Киев

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко
и членом редколлегии спецвыпуска профессором С.В. Пономаревым*

Ключевые слова и фразы: емкостный преобразователь; контроль состава веществ; неискажающий контроль; проточный трехконтактный датчик.

Аннотация: Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию параметров и функциональных возможностей емкостного проточного первичного измерительного преобразователя, предназначенного для контроля диэлектрических свойств транспортируемых по трубопроводу веществ, в частности, веществ с повышенной активной составляющей электрической проводимости. Преобразователь относится к классу трехконтактных емкостных систем, которые в отличие от обычных двухконтактных конденсаторов имеют высокую стабильность электрических параметров, точность и помехозащищенность.

Обозначения

V' - действительная постоянная в расчетной модели для четырех проводников;

V'' - действительная постоянная в расчетной модели для трех проводников;

C'_{12} - частичная емкость на единицу длины между электродами 1 и 2;

C'_{12} - частичная емкость на единицу длины между электродами 1 и 2 в расчетной модели для четырех проводников;

C'_{12} - частичная емкость на единицу длины между электродами 1 и 2 в расчетной модели для трех проводников;

C_{12u} - частичная емкость, измеряемая трансформаторным мостом;

C_{12x} - емкость между измерительными электродами 1 и 2 собственно в контролируемой среде;

$C_{n1} = C_{n2} = C_{II}$ - емкости образованные защитной пленкой над электродами 1 и 2 конденсаторов с плоскопараллельными электродами (с параметрами δ и ϵ_n);

E - напряженность электрического поля;

\dot{E}' - комплексная напряженность электрического поля системы четырех проводников.

\dot{E}'' - комплексная напряженность электрического поля системы трех проводников;

a_1, a_2 координаты торцов a_2 измерительных электродов вдоль оси ζ ;

h - высота распространения электрического поля над плоскими электродами (радиус трубы);

Z - комплексная переменная в исходной модели;

$t = 1/\zeta + a_1$ - переменная;

δ - толщина защитной диэлектрической пленки на электродах (толщина стенки диэлектрического трубопровода);

ϵ - диэлектрическая проницаемость среды между электродами;

ϵ_n - диэлектрическая проницаемость защитной пленки;

ϵ_x - диэлектрическая проницаемость контролируемого вещества;

φ_1, φ_2 - потенциалы высокопотенциального 1 и низкопотенциального 2 электродов;	π - константа (число «пи»);
φ'_1, φ'_2 - потенциалы высокопотенциального 1 и низкопотенциального 2 электродов в расчетной модели для четырех проводников;	τ_2 - заряд на единицу длины низкопотенциального электрода 2;
φ''_1, φ''_2 - потенциалы высокопотенциального 1 и низкопотенциального 2 электродов в расчетной модели для трех проводников;	τ'_2 - заряд на единицу длины низкопотенциального электрода 2 в расчетной модели для четырех проводников.
η - ордината комплексной переменной ζ .	τ''_2 - заряд на единицу длины низкопотенциального электрода 2 в расчетной модели для трех проводников;
	ξ - абсцисса комплексной переменной ζ .
	ζ - комплексная переменная в расчетной модели;
	th - гиперболический тангенс.

Высокая стабильность электрических параметров, точность и помехозащищенность поликонтактных (в частности, трехконтактных) систем определяются тем, что в таких системах возможно подключать емкостный преобразователь при помощи нескольких соединительных линий к измерительному прибору (трансформаторному мосту переменного тока). При этом на результат измерения частичной емкости между любыми двумя группами электродов, каждая из которых находится под своим потенциалом, не влияют значения всех других частичных емкостей системы (а также и их изменений), в том числе, и частичных емкостей на экран устройства.

Следует также отметить, что диапазон абсолютных значений и изменений емкости в поликонтактных системах обычно соответствует $10^{-5} - 10$ пФ. Однако емкости такого порядка (и более малые) с успехом измеряются при помощи трансформаторных измерительных мостов с наивысшей степенью точности и чувствительности.

На рис. 1 представлен продольный осевой разрез модели рассматриваемого датчика. Преобразователь представляет собой три кольцеобразных электрода, образующих, совместно с трубопроводом, секционированный полый цилиндр с постоянным поперечным сечением, что необходимо во избежание каких-либо механических искажений потока контролируемого вещества.

При измерении частичной емкости между электродами 1 и 2 (средний электрод 3, как и трубопровод в целом, подключаются к средней точке трансформаторного моста) очевидно возможны случаи, когда датчик становится нечувствительным к параметрам части контролируемого вещества, находящейся в области оси трубопровода. Во избежание этого следует знать закон изменения интенсивности электрического поля датчика по сечению трубопровода, что возможно на основе установления закона изменения емкости преобразователя в зависимости от линейных размеров устройства.

С этой целью вначале подробнее остановимся на рассмотрении плоского сечения датчика (см. рис. 1). Данное сечение можно рассматривать как систему плоскопараллельных электродов с бесконечно малой длиной и, следовательно, считать электрическое поле в таком устройстве плоскопараллельным. Совершенно очевидно, что в силу полной геометрической и электрической симметрии такого преобразователя его емкость будет в два раза больше емкости одной из половин устройства, разделяемых плоскостью, следом которой на чертеже является осевая линия. При этом линии электрического поля, замыкающиеся на электродах одной из половин преобразователя, никогда не пересекут указанной плоскости, которая, следовательно, является непроходимой границей раздела [1] двух данных сред (верхней и нижней).

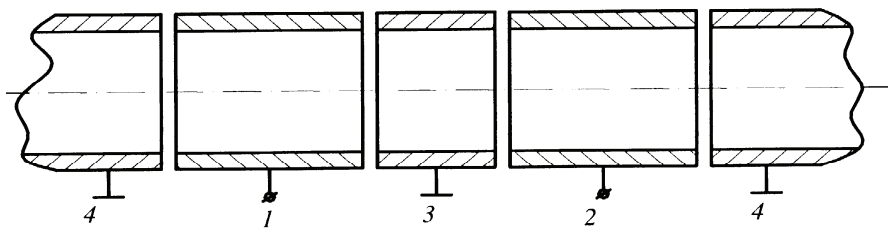


Рис. 1 Продольный осевой разрез проточного емкостного трехконтактного датчика

1, 2 – измерительные электроды; 3 – экранирующий электрод; 4 – трубопровод

Определим емкость между измерительными электродами одной из половин (например, нижней) полученного устройства (см. рис. 2, а). Вначале плоскость комплексного переменного z (заштрихованная область на рис. 2, а) конформно отображим на верхнюю полуплоскость нового комплексного переменного ζ (рис. 2, б) при соблюдении условия соответствия аналогичных точек исходной и отображенной плоскостей.

Такое отображение можно осуществить при помощи известной функции [1]:

$$\zeta = h \times th \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{z}{h} \right). \quad (1)$$

Далее учитывая, что при конформных отображениях разности потенциалов между соответствующими электродами и суммарные заряды последних, а следовательно, и емкости, сохраняются достаточно найти частичные емкости в системе электродов, представленной на рис. 2, б.

Для точного расчета емкости применим метод непосредственного определения напряженности поля [1, 2], согласно которому комплексная напряженность поля \dot{E}' системы проводников, представленной на рис. 2, б, имеет вид

$$\dot{E}' = \frac{B'}{(\zeta + a_1)(\zeta + a_2)}, \quad (2)$$

где B' — действительная постоянная, которая может быть определена по заданной разности потенциалов между электродами 1 и 2, однако для целей нашего исследования ее нахождение интереса не представляет.

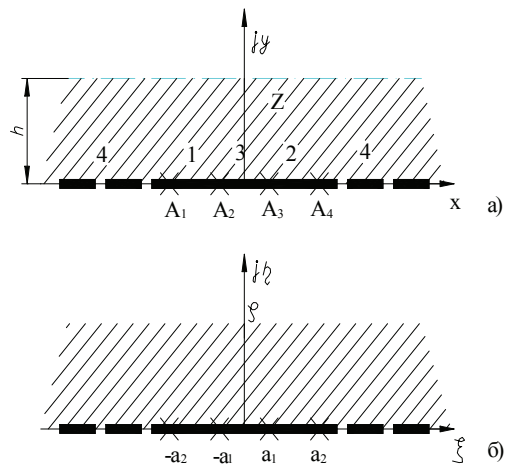


Рис. 2 Расчетная модель (а) и система электродов в отображенной плоскости (б) нижней половины преобразователя с плоскими электродами

x — изолированные стыки электродов; 1 и 2 — соответственно высокопотенциальный и низкопотенциальный измерительные электроды; 3, 4 — экранирующие электроды

Как известно [1], искомую частичную емкость на единицу длины между электродами 1 и 2 можно найти по формуле

$$C_{12} = \frac{\tau_2}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad (3)$$

где τ_2 - заряд на единицу длины низкопотенциального электрода 2; φ_1, φ_2 - потенциалы высокопотенциального 1 и низкопотенциального 2 электродов, соответственно.

Разность потенциалов между электродами 1 и 2 определим по формуле

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \lim_{\xi \rightarrow -a_2} \left[\pi(\xi + a_2) \frac{B'}{(\xi + a_1)(\xi + a_2)} \right] = \frac{\pi B'}{a_2 - a_1}. \quad (4)$$

Используя теорему Гаусса, найдем величину заряда на единицу длины электрода 2

$$\tau_2' = \varepsilon \int_{a_1}^{a_2} |E| d\xi = \varepsilon \int_{a_1}^{a_2} \frac{B' d\xi}{(\xi + a_1)(\xi + a_2)}. \quad (5)$$

Определив значение полученного интеграла [3]

$$\int_{a_1}^{a_2} \frac{B' d\xi}{(\xi + a_1)(\xi + a_2)} = \frac{B'}{a_2 - a_1} \ln \frac{\xi + a_1}{\xi + a_2}, \quad (6)$$

окончательно находим

$$\tau_2' = \frac{B' \varepsilon}{a_2 - a_1} \ln \frac{\xi + a_1}{\xi + a_2} \Big|_{a_1}^{a_2} = \frac{B' \varepsilon}{a_2 - a_1} \ln \frac{(a_1 + a_2)^2}{4a_1 a_2}. \quad (7)$$

Выполнив теперь требуемые вычисления согласно формуле (3), получим следующее точное выражение для определения искомой частичной емкости на единицу длины между измерительными электродами преобразователя с плоскими электродами при расположении его в бесконечной проводящей плоскости (что аналитически соответствует случаю установки проточного датчика в металлическом трубопроводе):

$$C_{12}' = \frac{\varepsilon}{\pi} \ln \frac{(a_1 + a_2)^2}{4a_1 a_2}. \quad (8)$$

Для случая, когда трубопровод выполнен из диэлектрического материала (что соответствует отсутствию в преобразователе с плоскими электродами, представленном на рис. 2, экранных электродов 4), аналогичным образом можно найти выражение для емкости между плоскими электродами в указанной аналитической модели.

Так, соответствующая выражению (2) для данного случая комплексная напряженность поля \dot{E}'' имеет вид:

$$\dot{E}'' = \frac{B''}{(\zeta + a_1) \sqrt{a_2^2 - \zeta^2}}. \quad (9)$$

Разность потенциалов между измерительными электродами 1 и 2 определяется по формуле

$$\varphi'' - \varphi_2'' = \lim_{\xi \rightarrow -a_1} \left[\pi (\xi + a_1) \frac{B''}{(\xi + a_1) \sqrt{a_2^2 - \xi^2}} \right]. \quad (10)$$

Заряд на единицу длины электрода 2 равен

$$\tau_2'' = \varepsilon \int_{a_1}^{a_2} |E| \, d\xi = \varepsilon \int_{a_1}^{a_2} \frac{B'' d\xi}{(\xi + a_1) \sqrt{a_2^2 - \xi^2}}. \quad (11)$$

В последнем выражении интеграл можно преобразовать к виду [3]

$$\tau_2'' = \varepsilon \int_{\frac{1}{a_1+a_2}}^{\frac{1}{2a_1}} \frac{B'' dt}{\sqrt{(a_2^2 - a_1^2)t^2 + 2a_1t - 1}}, \quad (12)$$

где $t = \frac{1}{\xi + a_1}$.

Вычислив полученный интеграл [3], окончательно находим

$$\tau_2'' = \frac{\varepsilon B''}{\sqrt{a_2^2 - a_1^2}} \ln \frac{a_2}{a_1}, \quad (13)$$

Истинное значение частичной емкости на единицу длины между измерительными электродами преобразователя с плоскими электродами (соответствующего случаю установки проточного датчика в диэлектрическом трубопроводе) на основе формул (3), (10), (13) следовательно описывается выражением

$$C_{12}'' = \frac{\varepsilon}{\pi} \ln \frac{a_2}{a_1}. \quad (14)$$

Обе полученные для анализа характера изменения электрического поля емкостного датчика по сечению трубопровода формулы (8) и (14) дают несколько завышенное значение емкости и несколько заниженное значение ее приращения с увеличением h , по сравнению с действительными значениями для кольцевых электродов (на единицу длины по дуге окружности). Однако с достаточной для практики точностью указанные выражения могут быть использованы для установления характера затухания электрического поля в трубопроводе в радиальном направлении и, соответственно, определения изменения относительной чувствительности преобразователя в указанном направлении, с целью исключения случаев инвариантности выходного сигнала емкостного датчика к свойствам вещества, находящегося в районе оси трубопровода.

В проведенном теоретическом анализе не учитывается электрическое поле, возникающее между измерительными электродами вне трубопровода. На практике отсутствие указанной емкости приводит к максимальной чувствительности датчика к свойствам контролируемого вещества и полностью исключает влияние на результат измерения внешних факторов, выражающихся в нестабильности электрического поля между электродами преобразователя и окружающими предметами.

Конструктивно исключить емкость между электродами вне трубопровода при сохранении высокой стабильности характеристик преобразования в рассматриваемом трехконтактном емкостном датчике весьма несложно (см. рис. 3).

Так, на среднем кольцевом заземленном электроде ортогонально трубопроводу устанавливают плоский экран (рис. 3, а), который с целью полного исключения чувствительности вторичного измерительного прибора (трансформаторного моста) к емко-

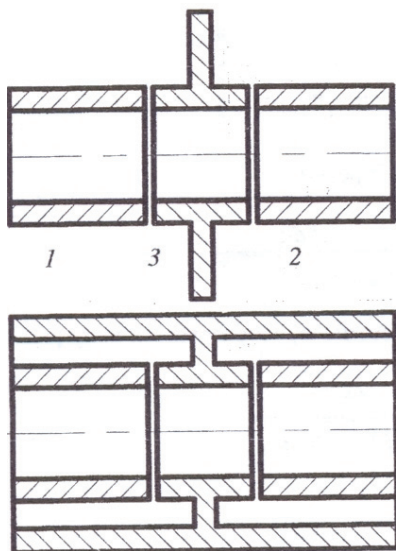


Рис. 3. Конструкции датчиков с внешним плоским и коаксиальным экраном
1, 2 – измерительные электроды

стыках колец, либо при помощи слоя диэлектрика, расположенного или снаружи колец (что имеет место, как правило, в случае металлического трубопровода), или внутри их (обычно при установке датчика на диэлектрический трубопровод, а также в случае контроля агрессивных веществ и веществ с повышенной активной электрической проводимостью). Два первых случая целиком соответствуют рассмотренной выше теоретической модели ((1)-(14)). Однако в третьем случае, ввиду нахождения слоя изолирующего диэлектрика в рабочем пространстве датчика, физика явлений несколько отличается, и возможны случаи потери чувствительности преобразователя к диэлектрическим свойствам контролируемого вещества в зависимости от соотношения диэлектрических проницаемостей защитной пленки ϵ_n и контролируемого вещества ϵ_x (см. рис. 4).

Так, при $\epsilon_n \gg \epsilon_x$ практически все силовые линии электростатического поля между электродами замыкаются по защитной пленке, и граница раздела диэлектриков с ϵ_n и ϵ_x является непроницаемой [1] для силовых линий поля. Датчик в этом случае не несет информации о процессах в зоне контроля.

При $\epsilon_x \ll \epsilon_n$ границу раздела двух данных сред можно считать эквипотенциальной, т.е. рассматривать ее как поверхность идеального проводника [1].

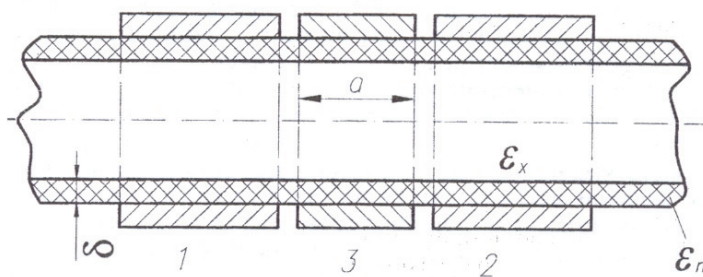


Рис. 4. Проточный датчик, установленный на диэлектрическом трубопроводе

сти между измерительными электродами имеет в данной плоскости протяженность, при которой дальнейшее увеличение последней не приводит к изменению частичной емкости C_{12u} , измеряемой указанным мостом [8].

Резкое сокращение размеров экрана возможно при использовании коаксиального электромагнитного экрана, окружающего преобразователь (рис. 3, б). При соединении плоского экрана с коаксиальным по всему периметру, размеры первого не имеют принципиального значения.

В реальных конструкциях преобразователя крепление кольцевых электродов датчика между собой и с трубопроводом возможно либо при помощи изолирующих прокладок в

Для раскрытия данного положения представим измеряемую емкость между электродами 1 и 2 C_{12u} в данном случае как последовательное соединение трех емкостей (что справедливо, с высокой степенью точности, при $\delta \ll a$) – емкости C_{1n} обычного конденсатора с двумя параллельными электродами, площадь которых равна площади электрода 1, а толщина диэлектрика и его диэлектрическая проницаемость, соответственно, равны δ и ϵ_n (см. рис. 4); емкости между измерительными электродами 1 и 2 собственно в контролируемой среде (C_{12x}); и (идентичной емкости C_{1n} у электрода 1) емкости C_{2n} у электрода 2 ($C_{1n} = C_{2n} = C_{II}$). Тогда можно показать, что измеряемая емкость C_{12u} такой системы практически не зависит от свойств контролируемой среды и равна

$$C_{12u} = \lim_{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_{II}} \rightarrow \infty} \frac{C_{II} \times C_{12x}}{C_{II} + 2C_{12x}} = \frac{C_{II}}{2}. \quad (15)$$

Полученное выражение для суммарной емкости C_{12u} соответствует случаю последовательного соединения двух конденсаторов, емкость каждого из которых равна C_{II} . Следовательно, промежуточная полезная емкость C_{12x} в такой системе эквивалентна сплошному проводнику и изменение ее свойств практически не приводит к изменению выходного сигнала емкостного датчика.

Оптимальным является случай, когда $\epsilon_n \approx \epsilon_x$. Если положить, что C_{12u} равна рассчитанной в идеальной модели, согласно (1)-(14), емкости C_{12} (что строго соответствует случаю $\epsilon_n = \epsilon_x$), то можно показать, что емкость между измерительными электродами C_{12x} собственно в контролируемой среде поддается расчету, составляет основной удельный вес в измеряемой датчиком емкости C_{12u} (при $\delta \rightarrow 0$) и несет, к тому же, полную информацию о диэлектрических свойствах контролируемого вещества.

Так, исходя из того, что $\delta \ll a$, из содержащегося в (15) выражения

$$C_{12u} = \frac{C_{II} \times C_{12x}}{C_{II} + 2C_{12x}}$$

можно получить, решив его относительно C_{12x} :

$$C_{12x} = C_{12} \frac{1}{1 - 2 \frac{C_{12}}{C_{II}}}. \quad (16)$$

Полученная зависимость показывает, что C_{12x} стремится к расчетному значению C_{12} при $C_{II} \rightarrow \infty$, т.е. при стремлении толщины защитной пленки к нулю.

Проведенные экспериментальные исследования рассмотренной конструкции датчика (рис. 4) доказали возможность определения количества различных примесей в контролируемых средах, в том числе примесей, повышающих активную электрическую проводимость вещества.

В экспериментах использовалась стеклянная труба с наружным диаметром 16 мм и внутренним 13,5 мм. Длина измерительных электродов равнялась 16 мм, а длину среднего заземленного электрода можно было изменять. Были проведены измерения емкости датчика в зависимости от содержания в дистиллированной воде примеси поваренной соли (длина среднего заземленного электрода была равна 16 мм, объем дистиллированной воды - около 20 см³).

Эксперименты показали высокую чувствительность датчика. Так, при емкости сухой трубы - 0,00052 пФ, и емкости трубы, заполненной дистиллированной водой -

0,5 пФ в случае растворения в воде 0,005 г соли емкость преобразователя изменилась до 2,68 пФ; при растворении 0,01 г - до 6,8 пФ; при 0,02 г - до 13,74 пФ, при 0,05 г - до 20,02 пФ, а при растворении 0,1 г - до 22,14 пФ. При растворении в 20 см³ дистиллированной воды 0,2 см³ спирта, емкость датчика изменилась до 0,54 пФ, 0,4 см³ - до 0,6 пФ и т.д.

Анализ диэлектрической проницаемости керосина проводился с изменением ширины заземленного электрода. Так, при длине данного электрода 16 мм (емкость пустой трубы C_0 при этом равна 0,00062 пФ) емкость системы с керосином оказалась равной 0,001388 пФ, при ширине 8 мм ($C_0=0,01202$ пФ) емкость равна 0,02408 пФ, при 4 мм ($C_0=0,0344$ пФ) $C_{12}=0,0648$ пФ.

Весьма перспективным является применение рассматриваемого датчика для определения момента появления пузырьков воздуха в транспортируемой жидкости (что очень актуально для предупреждения момента закипания жидкости в системах охлаждения тепловых и атомных электростанций, а следовательно, и предотвращения их тепловых взрывов подобных чернобыльскому). Для имитации попадания воздуха в воду в последнюю вводили трубки из изоляционных материалов и пропускали по ним воздух. Например, использовались поливинилхлоридные трубки с наружными диаметрами 6 и 3,5 мм и внутренними 5 и 3 мм, соответственно. При наполнении трубок водой емкость их была, соответственно, 2,4 пФ и 2,52 пФ, а при вытеснении воды воздухом - 2,20 и 2,52 пФ. При этом умеренное перемещение трубки по сечению трубопровода заметно не изменяло измеряемой емкости, что подтверждает правильность проведенных исследований и оптимизации конструкции датчика.

Исследование датчика (при ширине среднего электрода 4 мм) в реальных условиях пропускания пузырьков воздуха через толщу дистиллированной воды показало, что при использовании вторичного измерительного прибора с относительной чувствительностью по емкости порядка 0,1%, возможна надежная регистрация прохождения каждого пузырька воздуха диаметром не менее 1 мм.

В заключение следует отметить, что все проведенные теоретические и экспериментальные исследования проточного емкостного датчика справедливы для случая, когда линейные размеры преобразователя во много раз меньше длины волны электромагнитного поля, создаваемого питающим датчик напряжением. Именно это обстоятельство позволяет рассматривать с высокой степенью точности возникающее в преобразователе поле как электростатическое.

Список литературы

1. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергия, 1969. - 384 с.
2. Новый метод теоретического исследования магнитного поля электромагнитных систем / Сочнев А.Я. // Труды ДАН СССР. - 1941. - Т. 33, № 1. - С. 25.
3. Градштейн Н.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. - М.: Физматгиз, 1965. - 1103 с.
4. Особенности емкостного трехэлектродного датчика с открытым полем / Грохольский А.Л., Тарасенко С.Д. // Проблемы повышения эффективности эксплуатации авиационной техники, Киев: 1979. - Вып. 4.
5. Емкостные первичные измерительные преобразователи диаметра изолированного микропровода / Грохольский А.Л., Горбов М.М. и др. // Измерения, контроль, автоматизация. - 1978. - № 2. - С. 16-24.
6. Современные средства контроля диаметра электропроводящих нитей емкостным методом / Грохольский А.Л., Горбов М.М. и др. // Измерения, контроль, автоматизация. - 1978. - № 3. - С. 19-25.
7. Гриневич Ф.Б., Грохольский А.Л. и др. Трансформаторные измерительные мосты. - М., Энергия, 1970. - 467 с.
8. А.С. № 972378 (СССР). Емкостной датчик / А.Л. Грохольский, В.И. Горшенев, Д.Г. Конев и др. - 1982. - Б.И. № 41.

Development of Optimum Construction of Pipe Capacity Measurement Converter of Substances Composition

S.D. Tarasenko

Ukraine State University of Food Technology, Kiev

Key words and phrases: capacity converter; substance composition control; non-distortion control; flow-type three-contact pickup.

Abstract: Parameters and functional capabilities of capacity flow-type initial measurement converter intended for control of dielectric properties of pipe transported substances, in particular, substances with increased active electric conductivity component are theoretically and experimentally verified. Converter belongs to the class of three-contact capacity systems, which unlike regular two-contact capacitors have high stability of electric parameters, accuracy and error probability.

Erarbeitung der Optimalkonstruktion von rohrkapazitiven Meßumformer der Stoffzusammensetzung

Zusammensetzung: Es sind die Abmessungen und die Funktionalmöglichkeiten von kapazitiven durchlaufenden primären Meßumformer theoretisch und experimentell untersucht. Dieser Meßumformer ist für die Kontrolle der dielektrischen Eigenschaften von durch die Rohrleitung transportierenden Stoffen, und eigentlich, Stoffen mit der erhöhten Aktivkomponente der elektrischen Leitfähigkeit vorherbestimmt. Der Umformer gehört zur Klasse der dreikontaktischen Kapazitätssysteme, die zum Unterschied von gewöhnlichen zweikontaktischen Kondensatoren eine hohe Stabilität der elektrischen Parameter, eine Genauigkeit und eine Störschutzung haben.

Elaboration de la construction optimale du convertisseur de mesure de la capacité de la composition de la matière

Résumé: Sont étudiés théoriquement et pratiquement les paramètres et les possibilités fonctionnelles du convertisseur de mesure de la capacité qui est destiné au contrôle des propriétés diélectriques des matières qui sont transportées par la tuyauterie, en particulier, les matières avec un composant actif de la conductibilité électrique élevé. Le convertisseur se rapporte à la classe des systèmes de la capacité à trois contacts qui ont une haute stabilité des paramètres électriques, une précision et une insensibilité aux parasites à la différence des condensateurs ordinaires à deux contacts.
