

УДК 621.317.73

А.И.Новик, докт.техн.наук, Е.Ю.Неболюбов, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

Построение самокомпенсированных уровнемеров для взрывоопасных сред

Описаны разработанные авторами структуры емкостных уровнемеров-сигнализаторов с автоматической компенсацией погрешности от изменений диэлектрических свойств контролируемой среды. В разработанных уровнемерах приняты меры для обеспечения возможности их использования при измерении уровня взрывоопасных веществ.

Описано розроблені авторами структури ємкісних рівнемірів-сигналізаторів із автоматичною компенсацією похибки від змін діелектричних властивостей контролюваного середовища. У розроблених рівнемірах прийнято заходи для забезпечення можливості їхнього використання при вимірюванні рівня вибухонебезпечних речовин.

Потребность в контрольно-измерительной и диагностической аппаратуре, способной работать в промышленных условиях, весьма велика. В частности, это относится к устройствам контроля уровня нефтепродуктов — бензина, керосина, дизельного топлива, масел и т.п.

Известно достаточно много отличающихся принципом действия и конструкцией уровнемеров — поплавокные, ультразвуковые, термозондовые, объемно-резонансные, оптоэлектронные, эндометрические, радиоизотопные и др., а также устройств, основанных на комбинации нескольких принципов действия. Особое место занимают емкостные уровнемеры. Являясь достаточно универсальными приборами, они обладают рядом преимуществ перед другими типами — простотой и надежностью, отсутствием движущихся частей, легкостью сопряжения с автоматическими системами управления, простотой установки и обслуживания, большим сроком службы, невысокой стоимостью.

В основу работы емкостных уровнемеров положено измерение емкости датчика, называемого иногда чувствительным элементом. Датчик представляет собой конденсатор с удлиненными электродами, расположенными вертикально в резервуаре и, таким образом, частично погруженными в контролируемую среду. Если относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ_c больше единицы (что обычно имеет место как для жидких, так и для сыпучих веществ), то емкость датчика будет зависеть от степени погружения его в контролируемую среду. Очевидно, что эта емкость зависит от изменений ϵ_c , что, в свою очередь, определяется

изменением состава вещества и его температуры.

Изменения ϵ_c в процессе измерения уровня приводят к отклонениям показаний от значений, выставленных при калибровке прибора, т.е. к погрешности измерения. В простейших уровнемерах этой погрешностью пренебрегают, в более совершенных принимают меры для компенсации влияния ϵ_c на результат измерения.

Отметим, что диэлектрическая проницаемость ϵ_r воздуха или газа над поверхностью вещества столь мало зависит от температуры, давления и состава газа, что ее отличиями от единицы обычно можно пренебречь.

При создании устройств, предназначенных для контроля уровня нефтепродуктов, обязательным является принятие мер по обеспечению их взрывобезопасности. Наиболее универсальным, гибким и экономически выгодным является вид взрывозащиты "искробезопасная электрическая цепь" [4, 5, 9]. Создание устройства такого типа требует применения комплекса определенных конструкторских и схемотехнических решений. В частности, электрические напряжения и токи на электродах датчика и других элементах устройства, находящихся во взрывоопасной зоне, не должны превышать предельно допустимых значений как в штатном, так и в аварийных режимах работы.

Емкостные датчики уровнемеров и сигнализаторов в зависимости от конкретных применений могут быть разной конструкции и, следовательно, иметь различную емкость на единицу длины (погонную емкость). Кроме того, в зависимости от необходимого диапазона измерения длина рабочего датчика может быть различной. Измерительный

преобразователь уровнемера должен допускать несложную перенастройку схемы для нормальной работы с датчиками различной погонной емкости и любой (в пределах заданных значений) длины.

Резервуары для хранения нефтепродуктов могут быть расположены в различных климатических условиях, в том числе и на открытом воздухе. Поэтому уровнемер должен надежно работать в широком диапазоне температур, быть защищенным от влияния влаги, брызг, пыли и других неблагоприятных внешних воздействий.

Таким образом, можно сформулировать следующие основные требования к уровнемерной аппаратуре промышленного применения:

- инвариантность измерений по отношению к электрическим свойствам контролируемой среды;
- обеспечение взрывобезопасности при эксплуатации уровнемеров-сигнализаторов;
- простота перенастройки уровнемера на конкретную конструкцию датчика и заданную его длину;
- надежность работы разрабатываемых устройств в условиях промышленных предприятий, в том числе при эксплуатации на открытом воздухе.

Структурная схема. Емкостный уровнемер-сигнализатор представляет собой измерительный преобразователь емкости датчика в унифицированный электрический сигнал постоянного тока.

Практика показывает, что в большинстве случаев предпочтительнее уровнемеры в виде двухблочной конструкции — первичного преобразователя ТТ, размещаемого непосредственно на объекте контроля (на верхней части чувствительного элемента емкостного датчика) и вторичного преобразователя ВП, размещаемого на некотором расстоянии в удобном и доступном для обслуживающего персонала месте. При этом в ПП находится собственно измеритель емкости с выходом по постоянному току (неунифицированный сигнал), а в ВП — масштабированный преобразователь неунифицированного сигнала с органами регулировки положения нуля и крутизны передаточной характеристики устройства, и формирователь выходного унифицированного сигнала. Кроме того, в блоке ВП расположены компараторы (один или несколько) с регулируемым порогом срабатывания и выходом на светодиодный индикатор для сигнализации о достижении заданного уровня и электромагнитные реле включения внешних исполнительных устройств, а также блок питания всего уровнемера. Здесь же при необходимости размещается барьер искрозащиты БИЗ (поскольку ПП находится во взрывоопасной зоне, а ВП — во взрывобезопасной).

С учетом изложенного блок-схему разрабатываемого уровнемера-сигнализатора можно представить в следующем виде (рис. 1). В блоке ПП находится измерительная цепь ИЦ, к которой подключен чувствительный элемент ЧЭ, содержащий в общем случае рабочий емкостный датчик C_p и

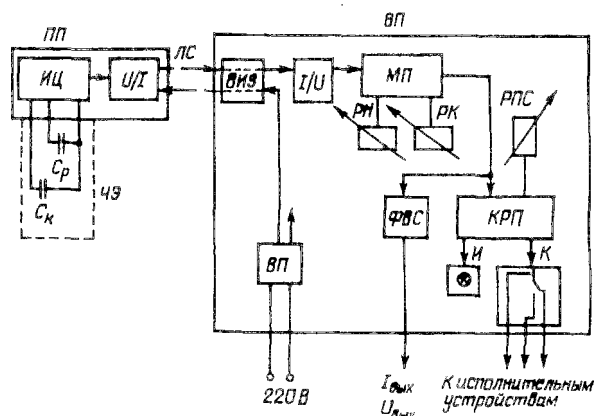


Рис. 1

компенсационный емкостный датчик C_k . Информационный сигнал постоянного напряжения с выхода ИЦ через измерительный преобразователь напряжение/ток (U/I) поступает на линию связи ЛС между ПП и ВП. По этой же линии связи на ПП приходит из ВП питающее напряжение. Во вторичном преобразователе ВП установлен блок (иногда называемый барьером) искрозащиты БИЗ, через который информационный сигнал (неунифицированный) поступает на преобразователь ток/напряжение (I/U) и далее на масштабированный преобразователь МП, к которому подключены органы регулировки положения нуля (РН) и крутизны (РК) передаточной характеристики устройства. С выхода МП напряжение поступает на формирователь выходного сигнала ФВС, который формирует выходной унифицированный сигнал: 0—5 мА, 0—20 мА либо 4—20 мА, подающийся на выходной разъем ВП для подключения внешних устройств индикации и регистрации. Кроме того, напряжение выхода МП подается на компаратор напряжения КРП, порог срабатывания которого пользователь может регулировать с помощью регулятора РПС. К выходу КРП подключено индицирующее устройство И (светодиод) и исполнительное устройство в виде электромагнитного реле, "сухое", т.е. гальванически изолированное от всех элементов ВП и ПП, переключающие контакты К которого также подключены к выходному разъему ВП. С помощью этих контактов может включаться или выключаться по достижении заданного уровня какое-либо внешнее исполнительное устройство. При необходимости иметь два независимых выхода на исполнительные устройства с установкой для каждого своего порога срабатывания в состав ВП вводится еще одна группа элементов КРП, РПС, И, К.

Преобразователь ток/напряжение, установленный в ВП, в простейшем случае выполняется по традиционной схеме, но для повышения степени искробезопасности может быть выполнен с гальванической развязкой входа и выхода (например, содержать последовательно включенные прецизионные преобразователи напряжение/частота и часто-

та/напряжении, между которыми включена развязывающая оптоэлектронная пара).

Блок питания БП, входящий в состав ВП, предназначен для создания необходимых питающих напряжений для всех узлов ВП и ПП.

Особенности измерительной цепи. Для того, чтобы исключить влияние диэлектрической проницаемости контролируемой ϵ_c среды на результат измерения уровня, необходимо получать информацию о текущем значении ϵ_c и каким-либо образом вводить ее в устройство для учета при формировании результата измерения. Эта операция может осуществляться, например, путем измерения ϵ_c отдельной измерительной цепью, к которой подключен компенсационный датчик, постоянно погруженный в контролируемую среду, и путем корректировки результата измерения уровня с помощью какого-либо вычислительного устройства. Такой принцип построения уровнемера использован, в частности, в [6, 8]. Недостатком является довольно узкий диапазон компенсации, а также большая громоздкость и сложность устройств. Более перспективно применение принципа **самокомпенсации**, когда к одной измерительной цепи подключены как рабочий, так и компенсационный датчики, а цепь построена так, что результат измерения зависит только от изменения уровня и принципиально не зависит от изменений величины ϵ_c . Основы теории самокомпенсированных уровнемеров и некоторые практические схемы описаны в [7]. К сожалению, использовать непосредственно эти схемы в данном случае нельзя, поскольку они основаны исключительно на применении элементов с тесной индуктивной связью — измерительных трансформаторов тока и напряжения. Требования некробезопасности не позволяют применить в блоках, находящихся во взрывоопасной зоне, трансформаторы и другие элементы цепей, характеризующиеся значительной индуктивностью, поскольку они являются накопителями энергии, способными в определенных ситуациях вызвать искру, и, следовательно, взрыв. При разработке серийно выпускаемого емкостного уровнемера ДУЕ-1 (г. Старая Русса, Россия) использованы принципы самокомпенсации влияния диэлектрической проницаемости контролируемого вещества [3]. Однако схемная реализация представляется крайне сложной и далеко не самой удачной (в частности, применено амплитудное детектирование измерительного сигнала с использованием работающих в режиме насыщения операционных усилителей; потенциально большие погрешности от стабильности; трудно настраивать устройство на конкретные параметры чувствительных элементов и др.).

Проведенные исследования показали, что перспективным является построение емкостных уровнемеров на основе коммутационных компенсационно-мостовых устройств ККМУ [1], с помощью которых достигается получение высокой точности

измерения в достаточно простых схемах без применения измерительных трансформаторов.

Структурная схема измерительной цепи самокомпенсированного уровнемера, созданная на базе ККМУ, показана на рис. 2. Цепь питается от источника опорного постоянного напряжения U_n . На выходе коммутатора $S1$, который периодически с частотой несколько килогерц переключается из одного состояния в другое, образуется импульсное напряжение прямоугольной формы, поступающее на

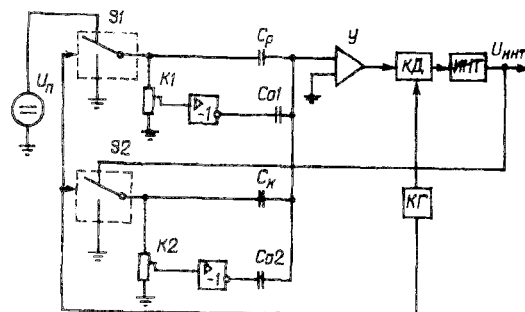


Рис. 2

один из электродов (левый по схеме) рабочего датчика уровнемера C_p . Это же напряжение через делитель напряжения (потенциометр) с коэффициентом передачи $K1$ и через прецизионный аналоговый инвертор поступает на образцовый конденсатор C_{01} . На компенсационный датчик C_k поступает сформированное аналогичным образом напряжение прямоугольной формы с коммутатора $S2$, а на образцовый конденсатор C_{02} — то же напряжение, уменьшенное делителем с коэффициентом $K2$ и проинвертированное вторым инвертором. На вход коммутатора $S2$ подается напряжение $U_{инт}$ с выхода устройства, т.е. с интегратора ИНТ. Все правые по схеме обкладки конденсаторов C_p, C_k, C_{01}, C_{02} объединены и подключены ко входу усилителя U с большим коэффициентом усиления. Усиленное напряжение неравновесия выпрямляется квадратурным детектором КД и поступает на вход интегратора ИНТ. Детектор КД работает синхронно с ключами $S1, S2$ благодаря тому, что логические сигналы управления как ключами, так и детектором КД формируются общим коммутационным генератором КГ.

Если напряжения на выходах ключей $S1, S2$ противофазны, то при определенных соотношениях величин $U_n, U_{инт}, C_p, C_k, C_{01}, C_{02}, K1, K2$ сигнал неравновесия на входе усилителя U станет равным нулю, соответственно будут нулевыми сигналы на выходе U , выходе КД, и интегратор ИНТ перестанет изменять свой выходной сигнал. Именно к такому равновесному состоянию всегда стремится данная схема благодаря глубокой отрицательной обратной связи с выхода на один из входов измерительной цепи. Определим соотношения между упомянутыми выше величинами после достиже-

ния состояния равновесия. После каждого переключения коммутаторов S1, S2 происходит переходный процесс перезаряда емкостей, который, благодаря правильному выбору частоты коммутации и параметров элементов схемы, значительно короче полупериода коммутации. По окончании этого процесса напряжения на выходах ключей S1, S2 устанавливаются практически равными напряжениям на подключенных в данный момент входах. Иными словами, на выходе S1 действует меандр (строго говоря, форма напряжения может несколько отличаться от меандра за счет неидеальных фронтов и за счет того, что скважность его может быть не точно равна 0,5, однако практического значения это не имеет) с размахом (двойной амплитудой), равным $U_{\text{н}}$; на выходе S2 — с размахом $U_{\text{шт}}$ на левых обкладках C_{01} и C_{02} размах прямоугольного напряжения с учетом знака — $(-K_1 U_{\text{н}})$ и $(-K_2 U_{\text{шт}})$ соответственно. Таким образом, условием равновесия является следующее выражение:

$$U_{\text{н}}(C_{\text{р}} - K_1 C_{01}) = \pm U_{\text{шт}}(C_{\text{к}} - K_2 C_{02}). \quad (1)$$

Здесь знак перед величиной $U_{\text{шт}}$ зависит от алгоритма управления ключами S1, S2, т.е. переключаются ли они синфазно или противофазно. В дальнейших выкладках будем предполагать, что работа ключей организована таким образом, что напряжения $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{шт}}$ имеют одинаковую полярность. Из (1) находим выходное напряжение цепи

$$U_{\text{шт}} = U_{\text{н}} \frac{C_{\text{р}} - K_1 C_{01}}{C_{\text{к}} - K_2 C_{02}}, \quad (2)$$

при этом $C_{\text{р}} \geq K_1 C_{01}$; $C_{\text{к}} > K_2 C_{02}$.

Емкость рабочего датчика $C_{\text{р}}$ складывается из двух частей — емкости нижней погруженной части и емкости верхней непогруженной. Обозначим емкость "сухого", непогруженного рабочего датчика через $C_{\text{р0}}$. Очевидно, что емкость полностью погруженного датчика будет $\epsilon_c C_{\text{р0}}$; при частичном заполнении резервуара емкость погруженной части будет $\epsilon_c C_{\text{р0}} h$, где h — относительный уровень вещества, отсчитываемый от нижнего конца рабочего датчика $C_{\text{р}}$ (величина h изменяется в пределах от 0 до 1); емкость верхней непогруженной части рабочего датчика будет равна $C_{\text{р0}}(1-h)$. Таким образом, полная емкость рабочего датчика (без учета паразитных емкостей, в частности, монтажных) равна

$$C_{\text{р}} = C_{\text{р0}} [h(\epsilon_c - 1) + 1]. \quad (3)$$

Емкость компенсационного датчика, всегда полностью погруженного в контролируемое вещество, в ϵ_c раз больше, чем его начальная "сухая" емкость $C_{\text{к0}}$

$$C_{\text{к}} = \epsilon_c C_{\text{к0}}, \quad (4)$$

ϵ_c — диэлектрическая проницаемость среды.

Подставив (3) и (4) в (2), получим

$$U_{\text{шт}} = U_{\text{н}} \frac{C_{\text{р}} h (\epsilon_c - 1) + C_{\text{р0}} - K_1 C_{01}}{C_{\text{к0}} \epsilon_c - K_2 C_{02}}. \quad (5)$$

Если при первоначальной настройке прибора обеспечить

$$K_1 C_{01} = C_{\text{р0}} \quad \text{и} \quad K_2 C_{02} = C_{\text{к0}}, \quad (6)$$

то равенство (5) приобретает вид

$$U_{\text{шт}} = U_{\text{н}} C_{\text{р0}} h / C_{\text{к0}}. \quad (7)$$

Таким образом, на выходе измерительной цепи действует напряжение $U_{\text{шт}}$, прямо пропорциональное измеряемому уровню h , отношению начальных ("сухих") емкостей рабочего и компенсационного датчиков и опорному напряжению $U_{\text{н}}$ (которое в данной схеме должно быть стабилизированным). Как видим, уравнение (7) инвариантно по отношению к нестабильной величине ϵ_c , т.е. цепь может быть названа самокомпенсированной. Емкости $C_{\text{р0}}$ и $C_{\text{к0}}$ определяются лишь конструкцией и геометрическими размерами датчиков и являются стабильными параметрами.

При наличии неизбежных в любом устройстве паразитных емкостей ($C_{\text{н1}}$ и $C_{\text{н2}}$ соответственно), шунтирующих емкости $C_{\text{р}}$ и $C_{\text{к}}$ (эти паразитные емкости могут быть сведены к минимуму путем использования рациональной конструкции устройства и несложной экранировки подводящих проводов), их влияние может быть скомпенсировано некоторым изменением параметров C_{01} , C_{02} , K_1 , K_2 — при этом равенства (6) должны быть несколько изменены

$$K_1 C_{01} = C_{\text{р0}} + C_{\text{н1}}, \quad K_2 C_{02} = C_{\text{к0}} + C_{\text{н2}}. \quad (8)$$

Для облегчения первоначальной настройки прибора в состав измерительной цепи введены два подстроечных потенциометра с коэффициентами передачи K_1 и K_2 . В принципе настройка прибора на конкретные значения $C_{\text{р0}}$ и $C_{\text{к0}}$, т.е. выполнение условий (6) либо (8), может быть осуществлено и без этих потенциометров (при $K_1 = K_2 = 1$) подбором емкостей образцовых конденсаторов C_{01} и C_{02} . Однако на практике, при неизбежном технологическом разбросе емкостей датчиков и паразитных емкостей $C_{\text{н1}}$ и $C_{\text{н2}}$, точная подгонка значений C_{01} и C_{02} необходима была бы для каждого экземпляра уровнемера, а учитывая дискретность номинальных значений емкости выпускаемых конден-

саторов, легко понять, насколько трудосложным будет этот процесс. Настройка измерительной цепи происходит в два этапа: сначала в зависимости от типоразмеров датчиков C_p и C_k устанавливают образцовые конденсаторы C_{01} и C_{02} ближайших к расчетному значению номиналов (грубая настройка), а затем, подстройкой значений K_1 и K_2 путем регулировки потенциометров добиваются точного выполнения равенств (6) или (8) (точная настройка). Некоторая корректировка настройки может понадобиться и после установки датчиков в резервуар, в котором будет контролироваться уровень.

Недостатком измерительной цепи по схеме рис. 2 является следующее. Два прецизионных инвертора, с которых подаются напряжения на образцовые конденсаторы C_{01} и C_{02} , выполняются на основе инвертирующих операционных усилителей (ОУ). В данной схеме к этим ОУ предъявляются повышенные требования по быстродействию, так как они должны передавать сигналы прямоугольной формы, содержащие широкий спектр частот. Но даже и при использовании быстродействующих ОУ переходные процессы после прохождения фронтов меандра получаются достаточно длительными, что в конечном счете влияет на погрешность уравнивания, приводит к некоторой нелинейности переходной характеристики устройства. Кроме того, для построения двух инвертирующих ОУ требуется четыре высокостабильных резистора.

Для устранения указанного недостатка можно воспользоваться упомянутым выше свойством коммутационных схем, заключающимся в возможности инвертирования подаваемых на плечевые импедансы напряжений с помощью смены на противоположную фазу управляющего соответствующим коммутатором сигнала. Модернизированный вариант измерительной цепи показан на рис. 3. Здесь используется четыре ключа $S1.1, S1.2, S2.1, S2.2$, причем сигналы управления для пар $S1.1-S2.1$ и $S1.2-S2.2$ противофазны. Вместо инверторов в этой схеме использованы два повто-

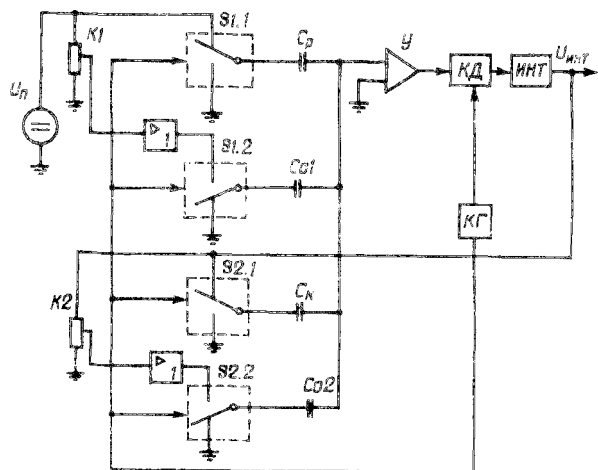


Рис. 3

рителя напряжения, причем они передают не меандр, а постоянное (или медленно изменяющееся) напряжение. В остальном эта цепь, ее работа и описывающие ее уравнения совпадают с рассмотренными ранее, относящимися к схеме рис. 2.

Обеспечение искробезопасности. Как уже отмечалось, для исключения возможности взрыва контролируемой среды необходимо, чтобы все находящиеся во взрывоопасной среде электронные компоненты и соединительные провода находились под такими напряжениями и токами, которые ни при каких обстоятельствах (в том числе и в аварийных ситуациях — обрыв или замыкание проводников, выход из строя полупроводниковых или др. элементов и т.п.) не будут превышать допустимых пределов, определяемых нормативными документами [4, 5, 9]. Минимальный набор мер, принятый при разработке описываемых устройств, включает следующее.

1. Измерительная цепь и вообще весь первичный преобразователь не содержат элементов, имеющих индуктивный импеданс и могущих быть накопителями энергии, достаточной для образования искры.

2. Конденсаторы, входящие в состав ПП, имеют минимально возможную емкость, допускающую нормальное функционирование устройства (не выше долей мкФ).

3. Значение питающего первичный преобразователь напряжения выбирается как можно ниже (компромиссом при использовании элементов широкого применения является значение 12 В). В совокупности с п. 2 это способствует тому, что накапливаемая конденсаторами энергия не превышает критических значений, при которых возможно опасное искрообразование.

4. Блок первичного преобразователя, находящийся во взрывоопасной зоне, получает питание от отдельного маломощного источника, размещенного в блоке ВП. При этом схемотехническими приемами выходной ток этого источника ограничен значением нескольких десятков миллиампер, что значительно выше потребляемого блоком ПП тока при нормальной работе. Приняты меры для исключения попадания сетевого напряжения на выход источника питания ПП (дополнительная обмотка силового трансформатора, отделенная от первичной и других вторичных обмоток не только двойной изоляцией, но и заземленным экраном; соответствующим образом выполненный монтаж деталей этого источника питания и т.п.).

5. Дополнительной мерой исключения попадания высокого (сетевого) напряжения из ВП в блок ПП и на соединительные провода между ними является установка в разрывы этих проводов (кроме общего провода — "земли") между ПП и ВП со стороны последнего барьера искрозащиты (БИЗ). Обычно это Т-образные цепочки, каждая из которых состоит из двух последовательно соединенных резисторов и достаточно мощного стабилитрона,

включенного между точкой соединения резисторов и землей. Монтаж ячеек искрозащиты выполняется по определенным правилам [9], весь блок искрозащиты заливается специальным компаундом и закрывается металлическим кожухом.

6. При использовании барьера искрозащиты в измерительных устройствах, подобных описываемому, возникают сложности, связанные с необходимостью исключения погрешностей из-за влияния БИЗ при передаче измерительных сигналов между блоками ПП и ВП. В данном случае это влияние сведено практически к нулю благодаря тому, что информативным параметром при передаче измерительной информации является не напряжение, а ток, а также за счет правильного выбора и согласования параметров выходной и входной цепей соответственно ПП и ВП.

Благодаря описанным мерам, любое замыкание в блоке первичного преобразователя (в том числе замыкание электрода чувствительного элемента — датчика — на землю), а также обрыв или замыкание любых соединительных проводов между ПП и ВП, не приводит к образованию искры с энергией, достаточной для воспламенения окружающей взрывоопасной среды.

В заключение отметим некоторые положительные особенности преобразователей "уровень контролируемой среды — напряжение постоянного тока", построенных по структурным схемам рис. 2 и рис. 3. Они выполняют ту же функциональную задачу, что и неуравновешенные мосты переменного тока, однако имеют по сравнению с последними ряд преимуществ: не требуются стабилизирующий по амплитуде генератор переменного напряжения и прецизионный детектор выходного сигнала; к тракту передачи сигнала от входа усилителя U до выхода интегратора ИНТ не предъявляются высокие требования по стабильности коэффициента передачи. Нестабильность частоты коммутации также не имеет большого значения. В таких устройствах плечевые импедансы подключены по трехзакжимной (потенциально-токовой, [1]) схеме, что позволяет простым экранированием подводящих проводов исключать из условия равновесия паразитные емкости этих проводов. И хотя ограничения на максимальные значения собственных емкостей данных экранированных проводов здесь более жесткие, чем в мостах с тесной индуктивной связью, тем не менее вполне возможно обеспечить дистанционное подключение датчиков с выносом их на расстояние до нескольких метров от измерительной цепи. К используемым в схеме коммутаторам не предъявляются очень жесткие

требования — при значениях емкостей датчиков до нескольких тысяч пикофард удовлетворительно работают бесконтактные ключи на основе МОП-транзисторов (с сопротивлением открытого ключа в десятки–сотни Ом), в частности, широко распространенные и доступные ИМС серий 590, 561, 1561. Особенно не критичным к параметрам ключей устройство становится, если при квадратурном детектировании ввести весовую функцию, отсекаемую начало каждого полупериода коммутации. Вообще, за исключением образцовых конденсаторов и источника опорного напряжения, в устройстве нет элементов и узлов, нестабильность которых (в частности, температурная) напрямую влияет на погрешность измерения. Все сказанное плюс простота схем позволяет рекомендовать описанные структуры как наиболее оптимальные для применения в емкостных уровнемерах промышленного назначения для очень широкого круга контролируемых сред.

1. Гриневич Ф.Б., Носик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. — К.: Наукдумка. 1987. — 112 с.

2. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. — 2 изд. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1988. — 301 с.

3. Датчик уровня емкостной ДМЕ-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — 1995. — Старая Русса. — 63 с.

4. Жданкин В.К. Некоторые вопросы обеспечения взрывобезопасности оборудования // Современные технологии автоматизации. — 1998. — № 2. — С. 98–106.

5. Жданкин В.К. Вид взрывозащиты "искробезопасная электрическая цепь" // Современные технологии автоматизации. — 1999. — № 2. — С. 72–83.

6. Кордов Г.Г., Лесинсон Б.А. и др. Автоматическая компенсация влияния изменений диэлектрической проницаемости измеряемой среды при измерении уровня емкостным методом // Труды НИИ "Теплоприбор". — 1962. — № 4.

7. Караидеев К.Б., Гриневич Ф.Б., Носик А.И. Емкостные самокомпенсированные уровнемеры. — М.—Л.: Энергия. 1966. — 136 с.

8. Lerner J., Drexel H., Bachofer H. Compensating capacitor for liquid level measurement / Pat. USA № 2974526, kl. 73-304, 14.03.61.

9. ГОСТ 22782.5-78. Электрооборудование взрывозащитное с видом взрывозащиты "искробезопасная электрическая цепь".

Получила 30.11.2006