

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В.С. Афонин

В статье рассматриваются методы измерения расхода сыпучего материала. Описывается возможность использования измерительного емкостного преобразователя для измерения расхода сыпучих материалов, перемещаемых в трубопроводах. Описывается метод измерения влажности сыпучего материала для введения поправки при измерении расхода с помощью емкостного преобразователя.

Ключевые слова: расход сыпучего материала, расходомер, емкостный преобразователь, диэлектрик, поляризация.

Введение

В различных отраслях промышленности существует необходимость измерения скорости движения (расхода) зернистых сыпучих материалов, перемещаемых по магистральным трубопроводам. Величина расхода сыпучего материала позволяет определять и корректировать нагрузку технологического оборудования, а так же контролировать производительность производственной линии. Сыпучие материалы, перемещаемые внутри трубопроводов, представляют собой поток газа и твердого вещества. Измерение расхода двухфазных веществ имеет свои особенности и трудности, связанные с неомогенностью состава смеси, различием скоростей отдельных фаз, а как же их концентрацией и структурой [1].

Обзор методов измерения расхода сыпучих материалов

На сегодняшний день известно большое количество различных методов измерения расхода сыпучего вещества. На практике часто встречаются приборы, разбивающие непрерывный поток сыпучего материала на небольшие порции вещества – дозы, а затем измеряющие массу каждой порции с целью определения массы вещества, прошедшего за определенный промежуток времени. Такие приборы разбивают непрерывный поток продукта, что сказывается на увеличении износа оборудования, вследствие неравномерной нагрузки на его рабочие поверхности.

Целью работы является разработка прибора для измерения расхода сыпучего материала, перемещаемого в трубопроводе, обеспечивающего неразрывность потока.

Для измерения расхода вещества широко используют методы, основанные на введении в поток метки и измерении ее скорости в потоке [2]. Метки могут быть самые разно-

образные: физико-химические, тепловые, оптические, ядерно-магнитные и другие. Эти приборы обладают широким диапазоном измерения расхода. Примером реализации такого метода может быть введение в поток сыпучего материала небольшого объема воды [3]. Появление даже незначительного объема воды в потоке сыпучего материала резко увеличивает диэлектрическую проницаемость этой части потока. Изменение диэлектрической проницаемости легко зафиксировать емкостным преобразователем. Водная метка вместе с потоком движется со скоростью потока некоторое расстояние. Если измерить время, прошедшее с момента введения метки до момента фиксации повышенной влажности, можно вычислить среднюю скорость движения потока в высокой точностью. При известной скорости потока и поперечном сечении трубопровода, по которому движется вещество, вычисляется объемный расход материала. За счет разных скоростей отдельных частиц сыпучего материала появляется ошибка в измерении, поэтому описанный метод не будет обладать высокой точностью.

Использование емкостного измерительного преобразователя

Емкостный преобразователь (ЕП) можно использовать для измерения его коэффициента заполнения сыпучим веществом с диэлектрической проницаемостью, отличной от единицы [4,5]. То есть такой датчик может быть использован как индикатор концентрации вещества в рабочей области измерительного конденсатора. В случае частичного заполнения конденсатора твердым веществом его можно рассматривать как конденсатор с двухслойным диэлектриком. В данном случае это воздушная прослойка и твердое

вещество. Емкость такого конденсатора можно определить по формуле [Берлинер]:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0 + \frac{d_1}{\varepsilon_1}}, \quad (1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, S – площадь электрода конденсатора, d_1 – расстояние между электродами конденсатора, занимаемое контролируемым материалом с диэлектрической проницаемостью ε_1 , d_0 – расстояние между электродами конденсатора, занимаемое воздушным зазором. Если диэлектрическая проницаемость ε_1 будет больше 1, то коэффициент заполнения $n = d_1 / (d_0 + d_1)$ будет существенно влиять на электрическую ёмкость ЕП.

Частицы сыпучего вещества имеют форму шара с радиусом R и располагаются хаотично по всему объёму измерительного конденсатора. Для упрощения представим смесь в виде двухслойного диэлектрика с объемами V_r (объём рабочей области конденсатора, занимаемый воздухом) и $V_{тв}$ (объём рабочей области конденсатора, занимаемый твердым веществом). Тогда при условии, что в емкостном преобразователе находятся N частиц сыпучего вещества можно вычислить $V_{тв}$ по формуле:

$$V_{тв} = V_{ш} N = \frac{4\pi R^3}{3} N. \quad (2)$$

Если известен объём твердого вещества, то при заданной площади электродов ЕП можно определить величину слоя диэлектрика:

$$d_1 = N \frac{4\pi R^3}{3S}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1) получим зависимость, связывающую емкость ЕП с концентрацией вещества в датчике.

Для измерения расхода такое устройство нужно дополнить датчиком скорости движения частиц в потоке. При измерении емкости ЕП нельзя получить данные о параметрах движения контролируемого материала. Однако эту задачу можно решить за счет наблюдения за скоростью изменения емкости измерительного конденсатора. Предположим, что концентрация вещества в системе достаточно низкая, что позволяет говорить о движении отдельных частиц контролируемого материала в поле датчика. При внесении ди-

электрика во внешнее электрическое поле происходит явление поляризации, способствующее изменению емкости конденсатора ΔC .

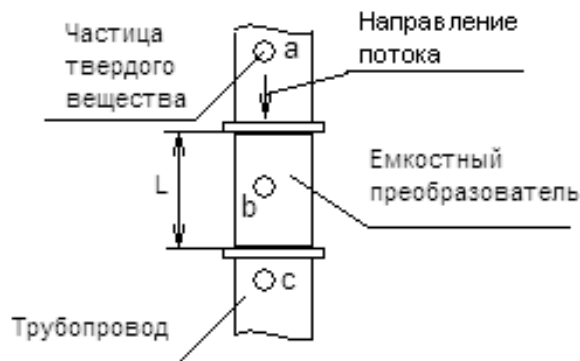


Рисунок 1- Схема движения частицы вещества в трубопроводе через ЕП

Рассмотрим процесс движения сыпучего вещества в трубопроводе со встроенным ЕП, разбив его на три этапа (рисунок 1):

- до появления вещества в электрическом поле ЕП его емкость равна C_0 (положение a);
- вещество находится между электродами преобразователя (положение b). Электрическая емкость ЕП: $C_{еп} = C_0 + \Delta C$;
- вещество находится за пределами электрического поля емкостного преобразователя (положение c). Электрическая емкость ЕП: $C_{еп} = C_0$.

Для измерения скорости движения твердого вещества требуется зафиксировать промежуток времени, при котором емкость преобразователя будет отличной от емкости C_0 . Измерение времени движения твердого вещества в ЕП позволяет определить скорость его движения:

$$g = L / t, \quad (4)$$

где L – длина электродов емкостного преобразователя, t – время движения частицы вещества в емкостном преобразователе.

Так как в трубопроводе, по которому перемещается сыпучий материал, движется большое количество частиц этого материала, удобней рассматривать в качестве информационного параметра не емкость измерительного конденсатора, а токи поляризации, вызванные ее изменением.

Рассмотрим появление частицы вещества в электрическом поле измерительного

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

конденсатора, на один из электродов которого подано постоянное напряжение. Изменение емкости отразится на заряде q , удерживаемом на электродах ЕП электрическим напряжением U между ними в соответствии с формулой:

$$\Delta C = \frac{\Delta q}{U}. \quad (5)$$

Так как значение напряжения между электродами поддерживается постоянным, за счет ЭДС источника питания, то изменение емкости конденсатора приведет к изменению заряда на его электродах. Приток заряда к электродам конденсатора образует ток поляризации:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (6)$$

В момент поляризации диэлектрика появляется электрический ток, направленный к электродам конденсатора. Далее все время нахождения диэлектрика в рабочей области датчика «пришедший» электрический заряд удерживается на поверхности электродов ЕП. В момент времени, когда диэлектрик вылетает из поля датчика, ток поляризации течет в обратном направлении. При перемещении частицы вещества через измерительный конденсатор создаются электрические токи, одинаковые по силе и направленные в разные стороны. То есть каждая пролетающая сквозь электрическое поле конденсатора частица будет создавать всплеск электрического тока, как показано на рисунке 2. Для измерения скорости достаточно определить время между двумя всплесками токов. Для организации измерения временных интервалов можно ис-

пользовать электрическую схему, представленную на рисунке 3. Схема содержит источник постоянного напряжения $V1$, выход которого подключен к электроду ЕП, представленному на схеме как конденсатор C .

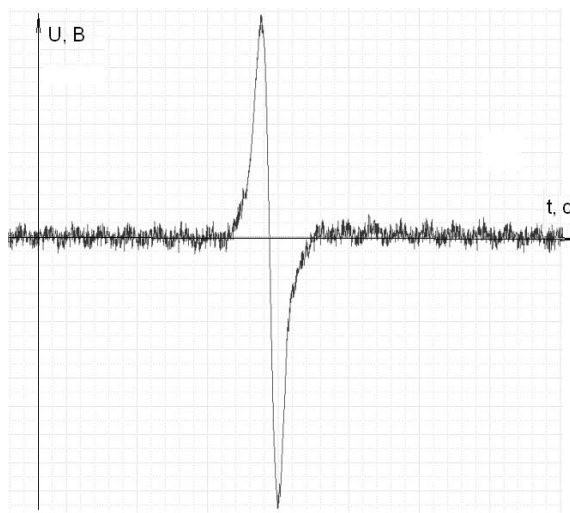


Рисунок 2- Сигнал с емкостного преобразователя при движении частицы вещества

Операционный усилитель $U1$, включенный по схеме усилитель тока, преобразует ток поляризации в напряжение, таким образом, что изменение направления тока будет вызывать изменение знака напряжения. Сигнал с усилителя тока подается на компараторы аналоговых сигналов, выполненных на операционных усилителях $U2$ и $U3$, для фиксации токов поляризации, вызванных движением твердого вещества.

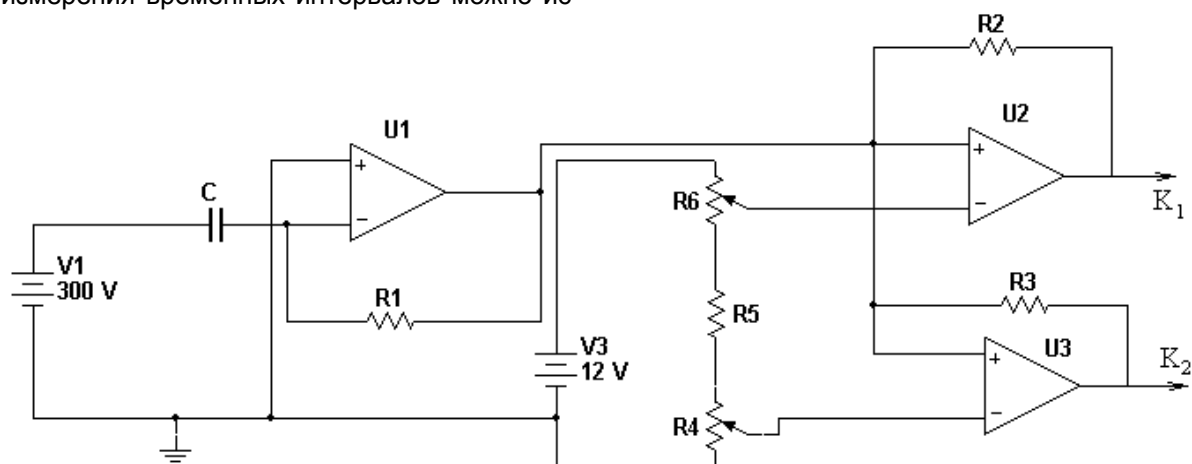


Рисунок 3- Электрическая схема для измерения скорости движения твердого вещества

Один компаратор настраивается так, чтобы на его выходе появлялось напряжение высокого уровня при появлении положительного импульса напряжения, а второй настраивается на отрицательный импульс напряжения. Управление напряжением переключения компараторов реализовано на переменных резисторах R6 и R4 и источнике постоянного тока V3.

Выходы компараторов K₁ и K₂ подключаются к микроконтроллеру для организации счета временного интервала между сигналами с компараторов. Микроконтроллер по заданной программе вычисляет скорость движения каждой частицы твердого вещества. В потоке отдельные частицы могут иметь различную скорость движения за счет многократного соударения и сопротивления воздушной среды. Это приводит тому, что для нахождения скорости потока контролируемого вещества необходимо вычислить среднюю скорость частиц за определенный промежуток времени.

В таком случае измеренная скорость движения контролируемого вещества и его концентрация в ЕП служат исходными данными для расчета массового и объемного расхода. Для определения функциональной зависимости расхода от измеренных параметров необходимо провести калибровку.

Введение поправки на влажность продукта

Величина тока поляризации зависит от концентрации контролируемого вещества в ЕП и его диэлектрической проницаемости. Известно, что наличие влаги в твердом веществе существенно влияет на его диэлектрические свойства. Для учета изменения влажности сыпучего материала предлагается дополнить устройство измерения расхода датчиком влажности. Данные о влажности контролируемого материала необходимы для введения поправки при измерении концентрации сыпучего вещества в ЕП. Измерение влажности организуется с помощью емкостного влагомера, так как такой способ отличается низкой себестоимостью и простотой реализации. Предлагается использовать в качестве емкостного преобразователя влажности сыпучих материалов конденсатор с перекрестной емкостью. Подобные конденсаторы известны в области метрологии как высокостабильные емкостные элементы и используются в качестве образцовых мер малой емкости. Конструктивно такой конденсатор выполнен в виде системы, как минимум, четырех электродов, расположенных на поверхно-

сти цилиндра с соблюдением условия, что частичные емкости каждой пары взаимно противоположных электродов равны. При этом условии емкость каждой пары на единицу длины будет постоянной и равна [6]:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \frac{\ln 2}{\pi}. \quad (7)$$

Кажущийся недостаток таких конденсаторов – малая емкость, который легко обходится при использовании специальных схем измерения на основе трансформаторного измерительного моста [6]. Именно в сочетании с последними, конденсаторы с перекрестной емкостью нашли свое применение.

Реализуется влагомер в соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 4. Влагомер сыпучих материалов содержит высокочастотный генератор 1, трансформатор 2 с тесной индуктивной связью между вторичными обмотками 3 и 4. Измерительное плечо, состоящее из вторичной обмотки 3 трансформатора и емкостного преобразователя 5, уравнивается компенсационным плечом, состоящим из вторичной обмотки 4 трансформатора 2, фазовращателя 6 и управляемого усилителя 7. После взаимодействия плеч, результирующий ток усиливается усилителем тока 8 и фиксируется фазовым детектором 9. Выходной сигнал с компаратора 10 приходит в микроконтроллер 11, который по определенной логике управляет с помощью управляемого усилителя компенсационным плечом.

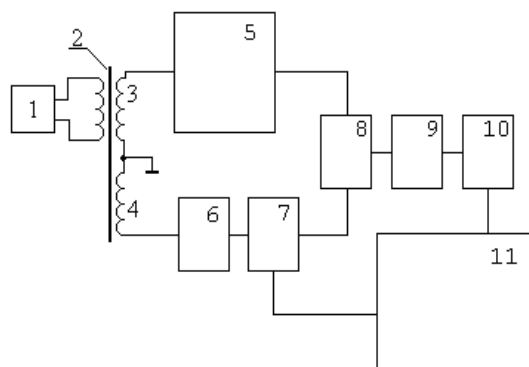


Рисунок 4 - Структурная схема влагомера сыпучих веществ

Сигнал с генератора 1, имеющий вид $u = U_0 \sin \omega t$, подается на первичную обмотку трансформаторного моста. На вторичных обмотках возникают сигналы:

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= U_0 k_3 \cdot \sin \omega t; \\ u_4 &= U_0 k_4 \cdot \sin(\omega t + 180^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где u_3 и u_4 – сигналы с вторичных обмоток 3 и 4; $k_{3,4}$ – коэффициенты трансформации. Вторичные обмотки трансформатора 2 включены встречно, поэтому выходные сигналы будут иметь разность фаз в 180° .

Одно плечо трансформаторного измерительного моста нагружено на ЕП 5, и называется измерительным. Как известно [7], упрощенная схема замещения ЕП с контролируемым веществом состоит из активного и реактивного сопротивлений, включенных параллельно. Таким образом, емкостной датчик с контролируемым веществом для измерительной схемы представляет собой комплексное сопротивление Z_d . По закону Ома ток, протекающий через датчик равен:

$$I_5 = \frac{U_3}{Z_d}. \quad (9)$$

В электрических цепях с емкостным элементом напряжение отстает от тока по фазе на четверть периода. В цепи с параллельными активным и емкостным сопротивлениями произойдет смещение тока по фазе на угол φ . Следовательно, электрический сигнал на выходе ЕП примет вид:

$$i_5 = I_5 \sin(\omega t + \varphi). \quad (10)$$

Токи измерительного и компенсационного плеч складываются в сумматоре 8. Для равновесия моста необходимо, чтобы алгебраическая сумма токов i_5 и i_7 равнялась нулю, т.е. $i_5 + i_7 = 0$. Для выполнения такого условия, компенсационное плечо должно иметь вид:

$$i_7 = I_7 \sin(\omega t + \psi + 180^\circ). \quad (11)$$

Для правильной работы мостовой схемы необходимо не только выполнение равенства токов, но так же важным условием является разница фаз этих токов в 180° . Для реализации данного условия компенсационное плечо содержит фазовращатель 6. Фазовращатель настраивают так, чтобы фазовый сдвиг компенсационного сигнала ψ был равен фазовому сдвигу измерительного сигнала φ . Управляемый усилитель 7 служит для управления амплитудным значением компенсационного сигнала I_7 . С помощью управляемого коэффициента k_y , меняется амплитуда сигнала по следующему закону:

$$I_7 = I_6 \cdot k_y. \quad (12)$$

Для фиксирования равновесия плеч моста применяются детекторы нуля. Один из самых распространенных детекторов является амплитудный детектор (АД). Выходная характеристика АД представлена на рисунке 5. По оси ординат отложено входное напряжение $U_{вх}$ после сложения токов измерительного и компенсационного плеч. По оси абсцисс отложено напряжение на выходе детектора $U_{вых}$.

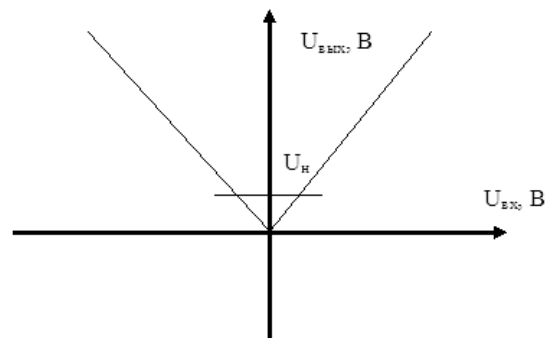


Рисунок 5 - Передаточная характеристика амплитудного детектора

АД имеет несколько существенных недостатков, не позволяющих использовать его в представленной измерительной схеме. Полупроводниковые диоды, используемые в АД, вносят погрешность, связанную с так называемой зоной нечувствительности U_n . Сигнал с меньшей амплитудой колебаний такой детектор просто неспособен зарегистрировать. Другой серьезный недостаток АД – нечувствительность к фазе детектируемого сигнала. Фаза, в данном случае, указывает на то плечо, которое имеет больший сигнал, и позволяет определить положение неуравновешенного моста. В таком случае есть следует использовать фазовый детектор (ФД), выходной сигнал которого зависит от фазы входного сигнала. В случае неуравновешенного моста, ФД 9 выдает сигнал, знак которого определяет компаратор 10. Управляющее устройство 11 уравнивает мост с помощью коэффициента k_y .

Таким образом, условие равновесия моста:

$$\frac{U_0 k_3 \omega C_d}{R_d} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = U_0 k_4 k_y \omega C_0 \sin(\omega t + \psi + 180^\circ) \quad (13)$$

В правой части уравнения (13) переменными являются емкость и активное сопротивление датчика, а в левой части коэффициент усиления k_y , подбирая который, можно добиться равновесия моста. Таким образом k_y

АФОНИН В.С.

является функционально связан с комплексным сопротивлением емкостного датчика Z. Для представления управляемого коэффициента k_y в единицах влажности необходимо проводить калибровку прибора.

В большинстве случаев влажность сыпучего вещества является важным показателем, характеризующим качество, поэтому приборы для измерения расхода и влажности сыпучих веществ рационально использовать совместно. Таким образом подобным решением преследуется цель не только повысить точность измерения массового и объемного расхода, но и расширить функциональные возможности прибора.

Выводы

Разрабатываемый прибор позволяет измерять массовый и объемный расход сыпучих материалов бесконтактным методом непосредственно в трубопроводе, не прерывая поток. Прибор может быть использован при измерении расхода и влажности сыпучих материалов, движущегося самотеком (под действием собственного веса) зерноперерабатывающих предприятий. Примером использования метода может быть пневмотранспорт, применяющийся для транспортирования зерна на предприятиях зернопереработки и других отраслей сельского хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник / П. П. Кремлевский. –

Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.

2. Плотников, А. Д. Сравнительный анализ приборов и методов измерения скорости и направления ветра / А. Д. Плотников, Л. И. Сучкова // Ползуновский альманах. - 2010. - № 2. - С. 119-121.

3. Патент 2371711 Российская Федерация МПК G01N27/22. Влагомер-расходомер зернопотока / Ключников В.В., Федотов В.К., Жуков Д.И.; заявитель и патентообладатель Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 2008118700/28, Заявл. 12.05.2008; Оpubл. 27.10.2009. Бюл. № 13. – 4 с.

4. Arakaki, C. Non intrusive mass flow measurements / C. Arakaki [et al.] // POSTEC Newsletter – 2006. - № 23. – С. 15-16.

5. Евстигнеев, В.В. Параметрические первичные измерительные преобразователи / В.В. Евстигнеев, М.М. Горбов, О.И. Хомутов. – М.: Высш. шк., 1997. – 181 с.

6. Горбова, Г.М. Теория и разработка бесконтактных электроемкостных трехэлектродных первичных измерительных преобразователей линейных микроперемещений: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Галина Михайловна Горбова – Барнаул, 2003. – 260 с.

7. Трансформаторные измерительные мосты. / Под ред. К.Б. Карандеева. - М.: Энергия, 1970.

8. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. — М.: Энергия, 1973. — 400 с.

Афонин В.С., к.т.н., доцент кафедры «Информационных технологий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: Afonin@mail.altstu.ru.