

А.И.Новик, докт.техн.наук, **А.С.Левицкий**, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев), **Л.А.Кесова**, докт.техн.наук, **Н.Н.Черезов**, канд.техн.наук, **Г.Г.Лукашук** (НТУУ «КПИ», Киев)

ЕМКОСТНЫЙ ПЫЛЕМЕР ДЛЯ УГОЛЬНЫХ КОТЛОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Описан разработанный авторами проточный измеритель концентрации угольной пыли в пыле-воздушной смеси, транспортируемой по трубопроводу. Пылемер состоит из емкостного датчика, соединительного триаксиального кабеля длиной несколько метров и электронного блока. Рассмотрены особенности построения пылемера, связанные со спецификой объекта измерения.

Описано розроблений авторами проточний вимірювач концентрації вугільного пилу в пило-повітряній суміші, що транспортується по трубопроводу. Пиломір складається з ємнісного датчика, з'єднувального триаксіального кабелю довжиною кілька метрів і електронного блока. Розглянуто особливості побудови пиломіра, що пов'язані зі специфікою об'єкта вимірювання.

Значительная часть тепловых электростанций Украины работает на твердом топливе – угле, который в современных котлах используется в мелко размолотом состоянии и подается в топку в виде пыле-воздушной смеси (ПВС) [2]. От равномерности пылеподачи во времени и по горелкам зависит температура факела в топке, глубина выгорания топлива и, в конечном счете, коэффициент полезного действия энергоблоков электростанции, а также экологические показатели уходящих газов котлов. Для поддержания оптимальной концентрации угольной пыли в ПВС при изменяющихся внешних условиях (нагрузка блока, качество топлива, уровень пыли в бункере, расход воздуха на горелки котла и др.) разрабатываются специальные системы автоматического регулирования процесса горения в реальном времени с учетом различных факторов.

Ключевым элементом системы автоматического регулирования подачи угля является проточный измеритель концентрации угольной пыли в ПВС – пылемер [3].

Пылемер может быть построен на основе различных принципов – оптического, радиоактивного, весового и др. Наиболее удобными, простыми и безопасными в обращении следует признать емкостные (импедансные) концентратомеры угольной пыли. Действие их основано на диэлькометрическом методе: диэлектрическая проницаемость (в общем случае – удельная комплексная электропроводность на переменном токе) смеси, заполняющей емкостный датчик, монотонно (в первом приближении – линейно) возрастает с увеличением концентрации угольной пыли в ПВС.

Датчик емкостного пылемера представляет собой два электрода, размещенные на поверхности диэлектрического отрезка трубы, врезанного в пылепровод. Конфигурация электродов может быть различной, основное требование – создать по возможности равномерное электрическое поле в поперечном сечении объема датчика (чтобы уменьшить влияние неравномерного распределения плотности пыли по сечению потока). Экспериментально исследовались несколько различных конструкций емкостного датчика:

— в виде набора прямоугольных пластин, расположенных по периметру трубы и соединенных одна с другой через одну (при этом нечетные пластины образуют один электрод, четные – другой); в виде двух полос, изогнутых по двухзаходной винтовой линии и расположенных одна напротив другой;

— в виде двух полуцилиндров, разделенных по образующим, параллельным оси датчика, и т.п. Эффективность той или иной конструкции, которая оценивается по величине начальной емкости пустого датчика и по величине приращения емкости после его заполнения угольной пылью, для перечисленных вариантов приблизительно одинакова. Для того, чтобы исключить или существенно уменьшить паразитные емкости датчика за счет силовых линий между внешними поверхностями электродов, пластины окружают с внешней стороны электростатическим экраном, который при использовании традиционной трехточечной схемы подключения датчика заземляют, а при использовании датчика с одним заземленным электродом – подключают к точке измерительной цепи с

защитным потенциалом. Внутренняя поверхность электродов отделяется от полупроводящей ПВС тонким слоем диэлектрика. При этом конструкция датчика должна обеспечивать защиту его внутренней поверхности от абразивного воздействия угольной пыли, загрязнения и образования нежелательных токопроводящих мостиков и перемычек.

Частота измерительного сигнала. В принципе для диэлькометрических измерений пригоден измерительный (тестовый) сигнал любой частоты звукового или ультразвукового диапазона, какие-либо особые требования к выбору частоты могут быть связаны с электрофизическими свойствами объекта измерения. Проведенные исследования показали, что в случае измерения концентрации взвешенной в воздухе угольной пыли, имеющей сложный физико-химический состав, наиболее адекватные результаты получаются при частотах измерительного сигнала около 1 МГц. Это значение рабочей частоты и выбрано в описываемом емкостном пылемере.

Измерительная цепь и схема подключения емкостного датчика. Измерительная цепь представляет собой полууравновешенный мост переменного тока, в котором емкость датчика сравнивается с емкостью образцового конденсатора. После установки на объект мост уравнивается вручную при пустом датчике. При заполнении пылевоздушной смесью мост выходит из равновесия, его выходной сигнал, приблизительно пропорциональный процентному содержанию угля в ПВС, усиливается, выпрямляется, фильтруется от переменной составляющей, усредняется для уменьшения влияния флюктуаций входной величины и передается на выход устройства.

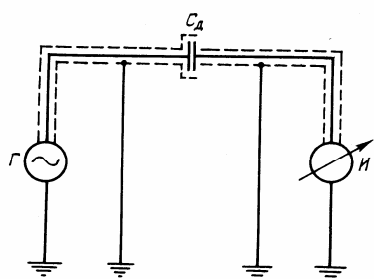


Рис.1

Имеется два выхода: стандартизованный токовый выход $0 \div 5$ мА для системы автоматического управления и контрольный выход по постоянному напряжению $0 \div 3$ В.

Традиционной, широко применяемой схемой включения емкостного датчика является так называемая трехзажимная (или трехточечная) потенциально-токовая схема (рис. 1), когда оба электрода конденсатора датчика C_d изолированы от земли, один из них подключен к генератору Г, второй – ко входу измерителя тока или индикатора И [1,4]. Оба подключающих провода, как и сам датчик, заключены в экран, соединенный с землей (рис. 2, а, где показан поперечный разрез датчика; 1 – труба из диэлектрика; 2, 3 – электроды емкостного датчика; 4 – наружные экраны электродов; 5 – экраны соединительных проводов; 6 – корпус датчика). В такой схеме легко устраняется влияние паразитных емкостей подводящих проводников, в качестве которых могут быть использованы отрезки коаксиального кабеля или обычного экранированного провода.

Однако попытка использования такой схемы в емкостном пылемере не дала удовлетворительных результатов. При увеличении концентрации угля γ в ПВС вначале происходило ожидаемое возрастание выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ пылемера, но по достижении некоторой, достаточно высокой концентрации, рост $U_{\text{вых}}$ замедлялся, затем останавливался, а при дальнейшем ее увеличении входной сигнал начинал уменьшаться (рис. 3). Детальное исследование этого явления позволило прийти к следующим выводам. Электропроводящая среда между электродами емкостного датчика (принципиально не важен характер этой электропроводности – емкостная, активная или комплексная, а важно наличие диэлектрического покрытия электродов) выполняет двойную роль. С одной стороны, она увеличивает результирующую электропроводность между пластинами датчика, в результате чего чем выше модуль удельной проводимости, тем больший ток протекает через цепь. С другой стороны, проводящая среда между электродами, имея вне датчика хороший контакт

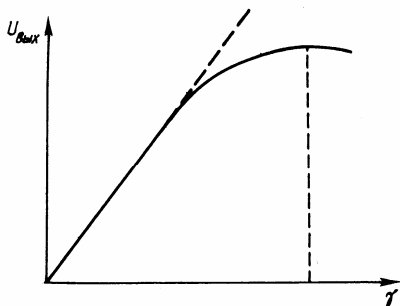


Рис. 3

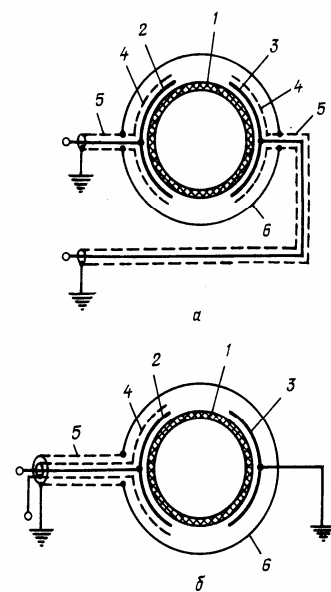


Рис. 2

С одной стороны, она увеличивает результирующую электропроводность между пластинами датчика, в результате чего чем выше модуль удельной проводимости, тем больший ток протекает через цепь. С другой стороны, проводящая среда между электродами, имея вне датчика хороший контакт

(гальванический или емкостный) с заземленными трубопроводами, играет роль электростатического экрана. При повышении электропроводности этого экрана все большая часть тока от высокопотенциального электрода уходит через экран на землю, благодаря чему ток на выходе датчика уменьшается. При больших удельных электропроводностях ПВС второй эффект начинает преобладать, и зависимость $U_{\text{вых}}$ от γ приобретает вид рис. 3 (производная функции уменьшается до нуля, а затем меняет знак на противоположный). Подробный анализ этого явления, в том числе, факторов, влияющих на положение точки экстремума функции, сделан применительно к датчикам емкостных уровней в [5].

Избежать подобной немонотонности и неоднозначности кривой $U_{\text{вых}}=f(\gamma)$ можно, если изменить конструкцию и схему включения емкостного датчика, соединив один из его электродов (3 – на рис. 2, б; обозначения элементов аналогичны рис. 2, а) с землей. Это влечет за собой необходимость изменения и измерительной цепи устройства. Второй электрод, высокопотенциальный или «горячий» (3 – на рис. 2, б) присоединяется к электронному блоку проводом, который для защиты от влияния паразитных емкостей должен быть заключен в два экрана – внутренний, эквипотенциальный, на который подается напряжение, равное и синфазное с напряжением на «горячем» электроде, и внешний, заземленный. Однако при этом возникает необходимость измерять ток в проводе, находящемся под высоким потенциалом. Исключить большие погрешности, связанные с утечками тока через паразитные емкости, удастся благодаря разработанному в ИЭД НАНУ принципу построения с использованием так называемого трансформатора с продольно экранированной обмоткой – ТПЭО [4,6,7].

На рис. 4 показана функциональная схема емкостного пылемера. Она включает стабилизированный по амплитуде генератор ГС синусоидального напряжения U_{Γ} частотой 1 МГц, трансформатор ТПЭО, операционный усилитель ОУ, выпрямитель В, масштабирующий усилитель МУ, усредняющее устройство (фильтр нижних частот первого порядка ФНЧ) со ступенчато регулируемой постоянной времени – для выбора необходимой степени усреднения сигнала, повторитель напряжения ПН, измерительный преобразователь напряжение-ток U/I , образцовые конденсаторы C_0 и C_{oc} , переменный компенсационный резистор R_k и два потенциометра R_{p1} и R_{p2} .

Питающее напряжение U_{Γ} с выхода генератора ГС подается на ТПЭО, представляющий собой ферритовый сердечник, на который нанесена обмотка из тонкого коаксиального кабеля. Экранирующая оболочка кабеля используется в данном случае как первичная обмотка, ее нижний (по схеме) конец заземлен. Вторичная обмотка (образованная внутренним проводником кабеля) включена между «горячим» электродом емкостного датчика C_d и точкой S суммирования токов мостовой цепи – инвертирующим входом операционного усилителя ОУ. Наводимые ЭДС в каждом витке первичной и вторичной обмоток ТПЭО полностью идентичны. Поскольку нижние концы обеих обмоток имеют одинаковый – нулевой потенциал, то и по всей длине обмотки, а также за ее пределами, внутренний и внешний проводники эквипотенциальны, благодаря чему отсутствуют утечки тока через паразитные емкости из цепи внутреннего соединительного провода. К точке S подключена также вторая ветвь моста – образцовый конденсатор C_0 , на который подано напряжение генератора через потенциометр R_{p1} «Установка нуля». Нетрудно видеть, что ток на выходе мостовой цепи, поступающий на вход ОУ с глубокой обратной связью (через конденсатор C_{oc}), равен разности токов датчика C_d и образцового конденсатора C_0 , в результате чего, если пренебречь погрешностью от статизма, выражение U_1 для напряжения на выходе ОУ будет следующим: $\dot{U}_1 = \dot{U}_{\Gamma} (C_d - kC_0) / C_{oc}$, где k – коэффициент передачи потенциометра R_{p1} (сопротивление R_{p1} выбрано пренебрежимо малым по сравнению с реактивным сопротивлением конденсатора C_0). Напряжение U_1 выпрямляется посредством выпрями-

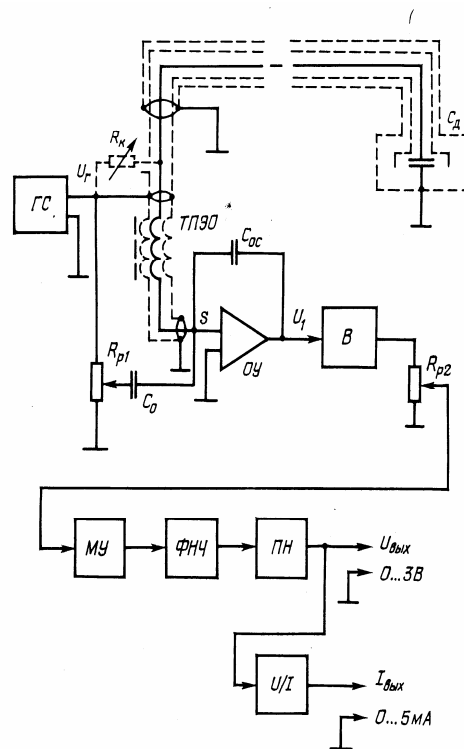


Рис. 4

теля В, затем через потенциометр R_{P2} «Крутизна», масштабирующий усилитель МУ, фильтр ФНЧ и повторитель напряжения ПН поступает на один из выходов устройства в виде напряжения $U_{\text{вых}}$. Кроме того, с помощью преобразователя U/I из напряжения $U_{\text{вых}}$ формируется нормированный выходной ток $I_{\text{вых}}$ с рабочим диапазоном изменений $0 \div 5$ мА.

Как видно из формулы, если установить значение k таким, чтобы $kC_0 = C_{\text{дп}}$ (где $C_{\text{дп}}$ – емкость пустого датчика), то мост будет уравновешен, и напряжение U_1 , а также выходное напряжение преобразователя $U_{\text{вых}}$ и его выходной ток $I_{\text{вых}}$ будут равны нулю. При появлении в датчике угольной пыли его емкость (в общем случае – комплексная проводимость) возрастает, и входной ток ОУ, напряжение $U_{\text{вых}}$ и ток $I_{\text{вых}}$ увеличиваются пропорционально концентрации угля в ПВС.

Соединительный кабель. Из изложенного видно, что емкостный датчик пылемера соединяется с электронным блоком кабелем с двойным экраном (в литературе применяется также термин «триаксиальный» кабель). Наиболее важным параметром при выборе соединительного кабеля является качество экранирования центрального проводника относительно внешнего экрана, которое характеризуется величиной т.н. электрической прозрачности внутренней экранирующей оплетки. В идеале эта прозрачность равна нулю, в реальных кабелях небольшой процент электрических силовых линий «просачивается» сквозь внутренний экран и обуславливает паразитную остаточную емкость. В описываемой схеме эта емкость включается параллельно рабочей емкости датчика и, если она стабильна по величине, то может быть скомпенсирована как составляющая начальной емкости датчика в процессе установки нуля (реально она составляет малые доли процента от начальной емкости датчика даже при длине кабеля в несколько метров).

Другим существенным моментом является влияние на работу пылемера распределенных параметров кабеля. По условиям работы длина соединительного кабеля может достигать 7–10 метров. На частоте 1 МГц длина волны в кабеле с учетом коэффициента укорочения $k_{\text{укор}} \approx 0,7$ составляет около 200 метров. При таком соотношении длин линии и волны уже заметно сказываются распределенные параметры кабеля. Проявляется это в данном случае в том, что в емкостном импедансе, подключенном к измерительному преобразователю через кабель, появляется квадратурная (активная) составляющая, которая особенно ощутима при пустом датчике, она не дает возможности уравновесить мост одной лишь регулировкой потенциометра R_{P1} . С целью компенсации влияния этой составляющей в измерительной цепи прибора предусмотрена еще одна регулируемая ветвь – резистор переменного сопротивления R_k . В процессе настройки перед началом работы поочередной регулировкой R_{P1} и R_k при пустом датчике мост уравновешивают полностью по первой гармонике рабочей частоты.

Описанный емкостный пылемер проверен в лабораторных условиях и показал хорошие результаты. В настоящее время изготовлена малая серия приборов (6 экземпляров), предназначенная для установки на агрегатах Трипольской ТЭС и опытной эксплуатации в составе автоматизированной системы пылеподдачи.

1. *Гриневиц Ф.Б., Новик А.И.* Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. – Киев : Наук. думка, 1987. – 112 с.
2. *Кесова Л.А., Литовкин В.В., Булыгин А.А.* Приоритетные направления инвестиций в «чистую» угольную энергетику Украины // Техн. электродинамика. Тем.вип. «Энергобережения в Україні: законодательство, теория, практика». – 2003. – С. 38–39.
3. *Кесова Л.А., Черезов Н.Н.* и др. Технология пылеподдачи с высокой концентрацией для котлов тепловых электростанций // Техн. электродинамика. Тем.вип. «Энергобережения в Україні: законодательство, теория, практика». – 2003. – С. 40–41.
4. *Новик А.И., Колупаев Ю.П.* и др. Особенности построения измерительных цепей для работы с емкостными датчиками // Техн. электродинамика. – 2005. – № 1. – С. 66–70.
5. *Новик А.И.* Особенности емкостного измерения уровня веществ с различной электропроводностью // Техн. электродинамика. – 2001. – № 4. – С. 66–72.
6. *А.с. № 661366 СССР, МКИ G 01 R 17/12.* Трансформаторный измерительный мост / А.И.Новик. // БИ. – 1979. – № 17.
7. *А.с. № 1536188 СССР, МКИ G 01 B 7/00.* Емкостный измеритель расстояния до заземленной поверхности / П.И.Борщев, А.И.Новик и др. // БИ. – 1990. – № 2.

Надійшла 03.02.09