Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 1, 1968 г.

УДК 681.089.6

СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСКРЕТНЫХ И НЕПРЕРЫВНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ФОСФОРИТНОЙ МУКИ

Е. С. Кричевский, А. Ф. Авдеева, И. К. Макарова

Созданию системы для экспрессных дискретных определений влажности фосфоритной муки в пределах 0—3,5% предшествовало исследование ее электрофизических свойств. Для этого на постоянном токе получена зависимость $\lg r = F_1(W)$ (r и W — соответственно объемное сопротивление и влажность фосфоритной муки).

Исследование фосфоритной муки в переменном поле проведено с помощью мостового измерителя полных проводимостей типа Е 10-2, разрешающего раздельное измерение активной r и реактивной x составляющих полного сопротивления в диапазоне частот до 30 *Мгц*. Как следует из анализа, характеристики $\lg r = F_1(W)$ и $\operatorname{tg}\delta = F_2(W)$ ($\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь материала) в пределах интересующего диапазона влажностей существенно нелинейны и имеют малую крутизну. Поэтому использовать их для построения влагометрической системы нерационально. Значительно эффективнее взять за основу построения влагометрической системы зависимости $\varepsilon = F_3(W)$ (ε — диэлектрическая проницаемость материала) (рис. 1). Они значительно ближе к линейным и имеют достаточную крутизну.

В общем случае емкость конденсаторного датчика с материалом зависит не только от влажности, но и от химического состава материала, его температуры, гранулометрического состава, плотности упаковки пробы в датчике и т. п. Изменения емкости dC в общем виде можно описать уравнением:

$$dC = \frac{\partial C}{\partial W} dW + \frac{\partial C}{\partial m} dm + \frac{\partial C}{\partial T} dT + \frac{\partial C}{\partial \Gamma} d\Gamma + \frac{\partial C}{\partial X} dX,$$

где T — температура материала; m, Γ, X — параметры, характеризующие, соответственно, плотность упаковки пробы в датчике, гранулометрический и химический составы материала. Зависимость емкости от влажности достаточно точно определяется только членом уравнения $\frac{\partial C}{\partial W}$.

Для измерения емкости конденсаторного датчика, заполненного фосфоритной мукой, использована резонансная схема с измерением частоты биений, обеспечивающим высокую чувствительность и точность.* Чувствительность метода можно оценить соотношением частоты биений и емкости контура:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} - \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+\Delta C)}} \cong f_1 \frac{\Delta C}{2C},$$

где f_1 и f_2 — частоты, фиксированная и зависящая от влажности материала; C — измеряемая емкость; L — индуктивность контура.

* Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. Энергия, 1965.

Отсюда

$$\Delta C = 2C \frac{\Delta f}{f_1}.$$

Поскольку оптимальная рабочая частота выбрана по данным анализа электрофизических свойств фосфоритной муки ($f_1 = 0{,}5$ *Мгц*), а современные индикаторные устройства, типа электроннолучевых трубок, могут реагировать на изменения частоты порядка 5 *гц*, то при изменении емкости заполненного пробой датчика C_x в пределах 27—40 *пф* (что соответствует изменению влажности от 0,1—2,5%) $\Delta C \approx (5{,}4 \div 8{,}0) \cdot 10^{-4}$ *пф*.

Столь высокий запас чувствительности позволяет осуществить мероприятия, необходимые для исключения влияния ряда мешающих факторов на изменение емкости. Как известно, изменение гранулометрического и химического состава влияет значительно больше на активное сопротивление

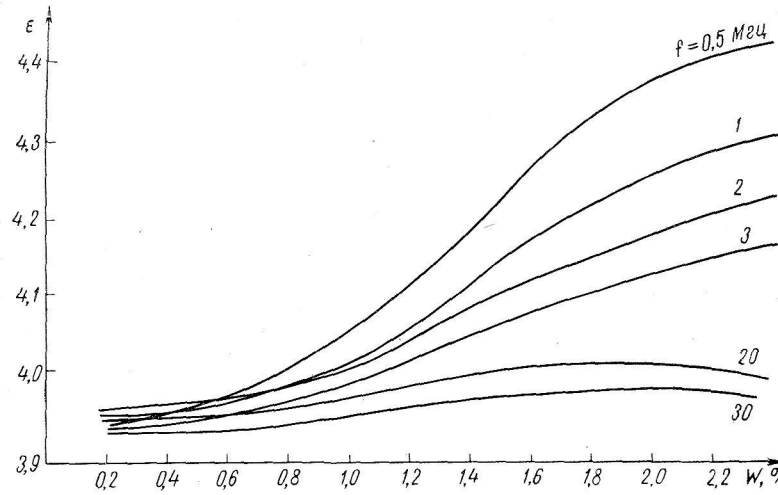


Рис. 1. Семейство характеристик $\varepsilon = F(W)$.

материала, чем на его диэлектрическую проницаемость. Поэтому, если датчик шунтировать активным сопротивлением, которое было бы на порядок ниже сопротивления материала, находящегося в датчике, то практически влияние названных факторов на изменение емкости было бы ничтожным. Однако шунтирование датчика малым сопротивлением резко снижает режим работы генератора, приводя его на границу срыва колебаний. В то же время, по известному в радиотехнике соотношению:

$$2\delta = \frac{1}{r}\left[\frac{1}{C} - S(K - D)\right],$$

где 2δ — коэффициент затухания; $K = \frac{M}{L}$ — абсолютная величина коэффициента обратной связи; r, C, L — соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность контура; D — проницаемость генераторной лампы; S — крутизна характеристики генераторной лампы, можно, используя лампы с большой крутизной, получить устойчивую работу генератора при шунтировании его колебательного контура сравнительно малыми сопротивлениями. Так, в данном случае за основу системы был принят серийно выпускавшийся прибор для измерения емкостей типа ГИЕ, в котором изменена схема и конструкция измерительного генератора. В частности, генераторная лампа заменена на 6Н6П ($S = 11$ *ма/в*). По разработанной схеме системы для дискретных измерений влажности (рис. 2) сопротивление r, шунтирующее контур измерительного генератора порядка 1,3 *ком*, удовлет-

воряет поставленному выше условию для фосфоритной муки и в то же время не нарушает устойчивой работы генератора в диапазоне влажностей 0,1—3,5%.

В результате исследования нескольких конструктивных форм конденсаторных датчиков для сыпучих материалов (апатитовый, нефелиновый

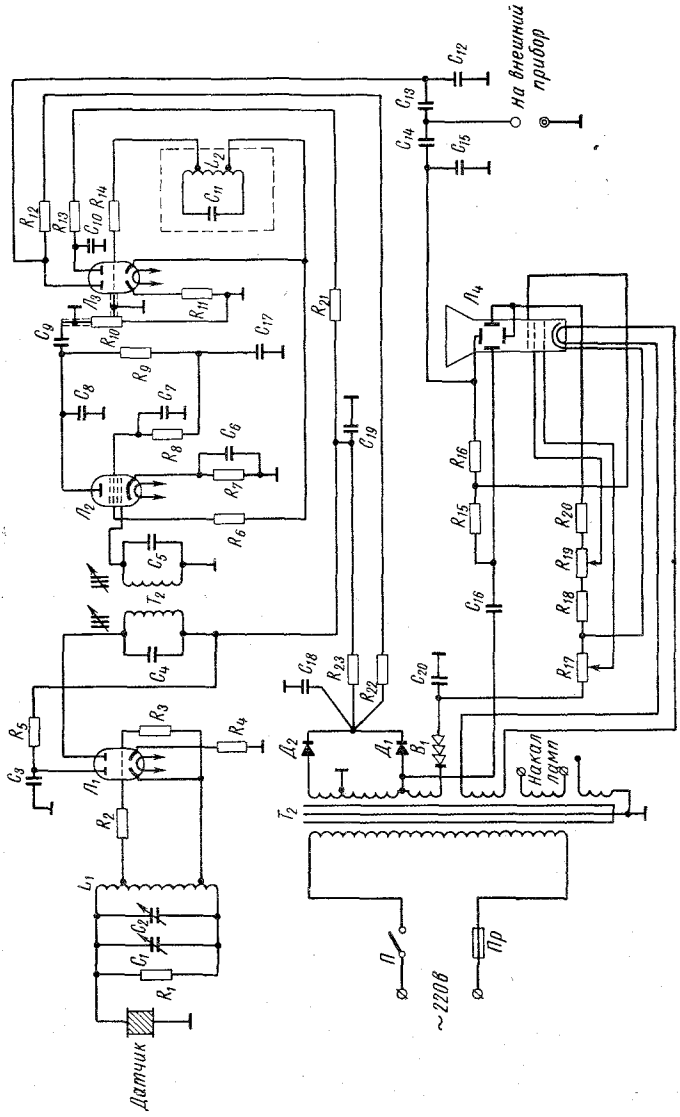


Рис. 2. Принципиальная схема системы для дискретных измерений.

и фосфоритовый концентраты) выбраны наиболее эффективные кольцевые односторонние датчики (рис. 3), где электрическое поле распространяется в некоторой ограниченной приэлектродной области и при загрузке сверх $^2/_3$ высоты датчика уровень материала практически не оказывает влияния на результаты измерений. Такой датчик разрешает измерения без отвешивания пробы.

Датчик рассчитан* как емкость ряда прямоугольников, наполовину *вдавленных в нижнюю полуплоскость, заполненную диэлектриком*

* З а х а р ю т а В. П. и др. Емкость двух прямоугольников. Изв. вузов, Электромеханика, № 7, 1965.

97628

с проницаемостью ε. Применительно к рассматриваемому случаю расчетная формула принимает вид:

$$C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_3 = \frac{2 + \varepsilon + \varepsilon_1}{4\pi^2} \frac{K\left(\sqrt{\frac{m^2-1}{m^2}}\right)}{K\left(\frac{1}{m}\right)} l + \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{2d}{R}} P,$$

где ε_0, ε_1 — диэлектрическая проницаемость соответственно воздуха и воздуха для пустого датчика или испытуемого материала при заполненном датчике; C_Σ — полная емкость датчика; C_1, C_2 и C_3 — емкость соответственно *верхней полуплоскости, нижней полуплоскости и монтажа*; $K(\ldots)$ — полный эллиптический интеграл первого рода; l — средняя длина пластин; d — расстояние между монтажными проводами; R — радиус монтажных проводов; P — длина монтажных проводов; m — расчетный параметр,

$$m = b + \alpha; \quad b = a + \lambda; \quad \alpha \approx \frac{2h}{\pi d}; \quad a = \alpha + 1; \quad \lambda = \frac{n\alpha\pi}{2h};$$

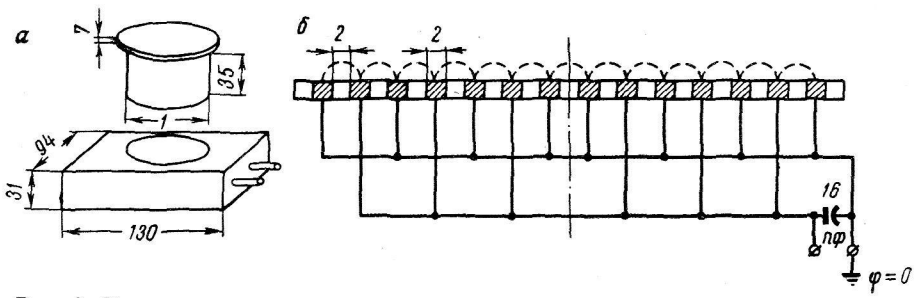


Рис. 3. Датчик системы для дискретных измерений: *а* — общий вид; *б* — схема внутренних соединений.

h — возвышение пластин над диэлектриком, равное 0,05 *мм*; n — ширина пластины.

Пластины рассматриваемого датчика закреплены на гетинаксовом основании, монтаж выполнен проводом с $2R = 0{,}6$ *мм*, $d = 30$ *мм* и $P = 50$ *мм*. Для незаполненного датчика получено

$$C_1 \approx 4{,}2 \text{ пф}; \quad C_2 \approx 10{,}6 \text{ пф}; \quad C_3 \approx 6 \text{ пф}.$$

Суммарная расчетная емкость

$$C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_3 = 4{,}2 + 10{,}6 + 6 = 20{,}85 \text{ пф}.$$

Этот результат хорошо согласуется с измеренной прибором емкостью незаполненного датчика — около 23 *пф*.

Для удобства эксплуатации параллельно датчику установлен подстроечный конденсатор и суммарная емкость пустого датчика доведена до 36 *пф*.

Заметим, что при заполнении датчика материалом изменяется только емкость верхней полуплоскости C_1, равная в начальном незаполненном состоянии 4,2 *пф* (при $C = 36$ *пф*). При заполнении фосфоритной мукой $W = 1\%$ суммарная емкость достигла 49 *пф*. Емкость, остающаяся неизменной, 36 — 4,2 = 31,8 *пф*. Следовательно, рабочая емкость датчика изменяется от 4,2 *пф* до 49 — 31,8 = 17,2 *пф*. Таким образом, чувствительность датчика будет 17,2 — 4,2 = 13 *пф*/%.*

---

* Часто, определяя приближенное значение отношения $\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)_W$, делят полную емкость датчика, заполненного материалом влажности W, на емкость незаполненного датчика C_0. На самом деле это отношение должно определяться как $\frac{C_1}{C_0}$, т. е. в рассматриваемом случае $\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)_{W=1\%} = \frac{17{,}2}{4{,}2} = 4{,}08$, а не 1,36, как получалось бы при делении полных емкостей заполненного и незаполненного датчиков.

Влияние плотности упаковки пробы в датчике и гранулометрического состава определяли созданием различных давлений на образец грузами, которые устанавливали на крышке датчика. Установлено, что величина груза почти не изменяет емкости датчика с фосфоритной мукой данной влажности и показания прибора хорошо воспроизводятся.

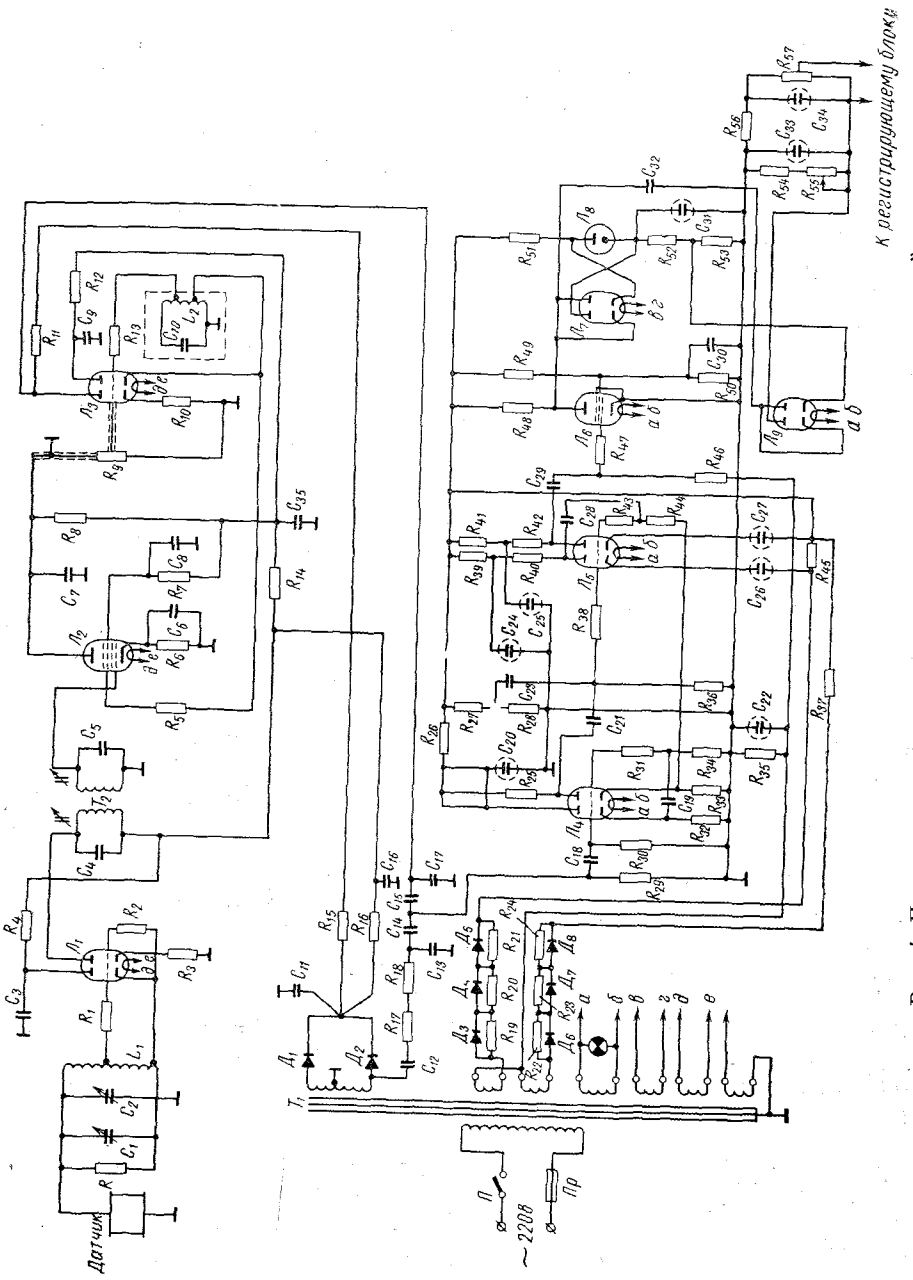


Рис. 4. Принципиальная схема системы для непрерывных измерений.

Влияние температуры материала на результаты измерений определяли по 100 замерам при +20 и +50° С. По результатам, обработанным методом корреляционного анализа на ЦВМ Минск-1, установлена прямолинейная корреляционная связь с коэффициентом корреляции, равным 0,965.

Уравнения регрессии, связывающие измеренное значение емкости $C_и$ и влажности W, для проведенных измерений имеют вид:

$$C_и = 12{,}7\,W + 35{,}8 \quad \text{для} \quad t = +20^\circ\,\text{C};$$

$$C_и = 13{,}3\,W + 34{,}5 \quad \text{для} \quad t = +50^\circ\,\text{C}.$$

Графики этих уравнений регрессии почти совпадают, что свидетельствует о незначительном влиянии температуры, которым практически можно пренебречь.

Систему испытывали в лаборатории кафедры автоматизации производственных процессов Ленинградского горного института и на комбинате «Фосфорит» в 1965 г. Эталоном служил метод, предписываемый ГОСТ 5716-51. Погрешность не превышала $\pm 0{,}15\%$ от влажности, определенной эталонным методом. Система принята комбинатом «Фосфорит» и эксплуатируется при технологических анализах. Продолжительность анализа не превышает 1—2 *мин* в отличие от 35—40 *мин* по старой методике.

В 1966 г. авторами настоящей статьи разработана система для непрерывных измерений влажности фосфоритной муки. В принятой за основу системе для дискретных измерений операция выравнивания частот f_1 и f_2 заменена преобразованием сигнала биений ($\Delta f = f_1 - f_2$) в постоянный ток, величина которого фиксируется автоматическим потенциометром.

Полная схема системы непрерывного автоматического контроля влажности фосфоритной муки приведена на рис. 4. Первая часть схемы (цепи ламп $Л_1$, $Л_2$ и $Л_3$) повторяет рассмотренный выше прибор для дискретных измерений влажности, исключая электроннолучевую трубку, так как выходной сигнал Δf передается на блок частотомера, где левая половина лампы $Л_4$ — катодный повторитель, правая половина $Л_4$ и $Л_5$ образует три ступени предварительного усиления и ограничения входного сигнала, лампа $Л_6$ — электронный коммутатор, $Л_7$ — диодный ограничитель, $Л_8$ — стабилизатор напряжения и $Л_9$ — выпрямитель разрядного тока. Выходной сигнал из цепи $Л_9$ подается на электронный потенциометр, с помощью которого фиксируются и наблюдаются текущие значения влажности.

Датчиком системы непрерывного контроля так же, как и дискретного контроля, является кольцевой конденсаторный датчик одностороннего контакта. Конструктивно такой датчик выполнен в виде фторопластовой пластины с семью латунными кольцами. Поскольку датчик устанавливается под сушильным барабаном в центре потока фосфоритной муки, то последняя, обильно покрывая поверхность датчика, создает достаточную плотность упаковки. Угол наклона датчика относительно потока выбран таким образом, чтобы поверхность датчика хорошо очищалась и непрерывно покрывалась новыми порциями материала. Приемлемые результаты получаются также при датчике со шнековым уплотнением.

Система для непрерывных автоматических измерений влажности, испытанная на комбинате «Фосфорит», внедрена в сушильном цехе комбината «Фосфорит» для непрерывной регистрации влажности, а также и в системе автоматического управления процессом сушки фосфоритной муки.