Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.ХУШ, вып. 1, 1975 г.

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЕМКОСТНОГО АВТОКОМПЕНСАЦИОННОГО ВЛАГОМЕРА

Е.С.Кричевский, Р.М.Проскуряков

Точность измерений емкостной влагометрической системы существенно зависит от того, в какой мере удается с ее помощью измерять только реактивную составляющую полной проводимости контролируемой пробы [2]. Рассмотрим это положение применительно к замкнутым влагометрическим системам (ЗВС).

Эффективным методом снижения составляющей погрешности ЗВС, обусловленной влиянием активных потерь и других неконтролируемых факторов, является их измерение и введение по полученным данным поправки в выходной сигнал системы. Формирование поправки осуществляется с помощью специальной корректирующей следящей системы (КС).

На схеме ЗВС (рис. 1) $Г_1$ и $Г_2$ – соответственно опорный и рабочий генераторы (схема F– метра). Датчик с исследуемым материалом Д подключается в колебательный контур рабочего генератора $Г_2$, частота которого f_2 зависит от изменения как емкости датчика $C_м$, так и его активного сопротивления $R_м$. Датчик подключен так же, как одно из плеч мостовой схемы, питаемой напряжением низкой частоты (например, 50 Гц) и состоящей из резисторов R_1, R_2 компенсационного сопротивления $R_К$ и датчика Д.

Питающей диагональю моста является диагональ ab, измерительной – диагональ de. Напряжение в измерительной диагонали de определяется величиной активного сопротивления датчика, так как емкость датчика на частоте 50 Гц пренебрежимо мала. Автокомпенсационная часть КС, состоящая из усилителя $У_2$, двигателя $Дв_2$ и переменного сопротивления $R_К$, автоматически балансирует мостовую схему изменением величины сопротивления $R_К$ в функции низкочастотного сопротивления датчика Д. Сопротивление $R_К$ одновременно включено в колебательный

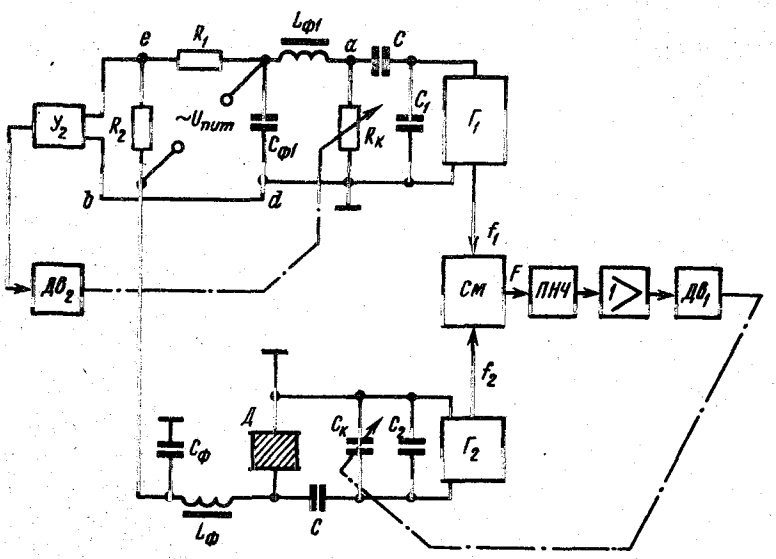


Рис. 1. Принципиальная схема ЗВС с корректирующей следящей системой

контур гетеродина $Г_1$. Поэтому частота колебаний f_1 изменяется в соответствии с изменением значения сопротивления $R_к$.

Таким образом, частота f_2 несет информацию о емкости датчика и о его активном сопротивлении. Частота f_1 несет информацию только об активном сопротивлении датчика. В смесителе См (см.рис. 1) эти частоты вычитаются и частота $F = f_1 - f_2$ (рис. 2) изменяется только в соответствии с изменением емкости датчика.[x] Автокомпенсационная схема измерительного контура ЗВС осуществляет непрерывную балансировку компенсационного конденсатора $C_к$.

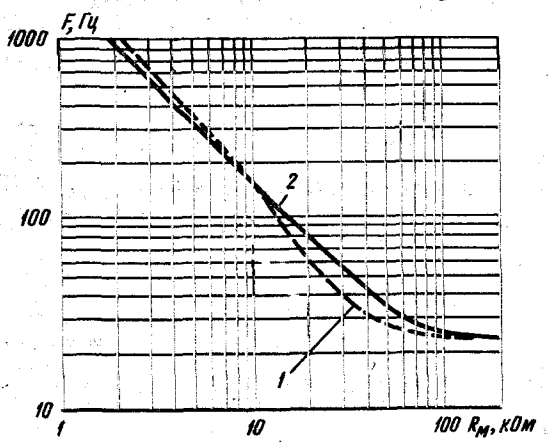


Рис. 2. Изменение частоты биений F в зависимости от значения активного сопротивления на входе ЗВС
1 и 2 – соответственно экспериментальная и расчетная характеристики

Заметим, что схема подключения компенсационного сопротивления $R_к$ и датчика Д в колебательные контуры генераторов должны быть одинаковыми. Одинаковыми выпол-

[x] Это положение справедливо для обширной группы материалов, у которых явлением скин-эффекта можно пренебречь.

няются также и схемы генераторов.

В качестве сопротивления $R_к$ может быть использован любой переменный резистор, номинальное значение которого перекрывает диапазон изменения сопротивления датчика. Однако предпочтение нужно отдавать бесконтактным управляемым сопротивлениям. Большой диапазон перекрытия сопротивления может быть достигнут при использовании управляемого транзистора.

Управляющее напряжение на базу транзистора подается с преобразователя угол поворота–напряжение. В качестве такого преобразователя используется миниатюрный масштабный вращающийся трансформатор ВТ. Ротор ВТ соединен механически с валом двигателя $Дв_2$ (рис. 3), а напряжение со вторичной обмотки, пропорциональное углу поворота вала двигателя, детектируется и подается на базу транзистора как управляющее.

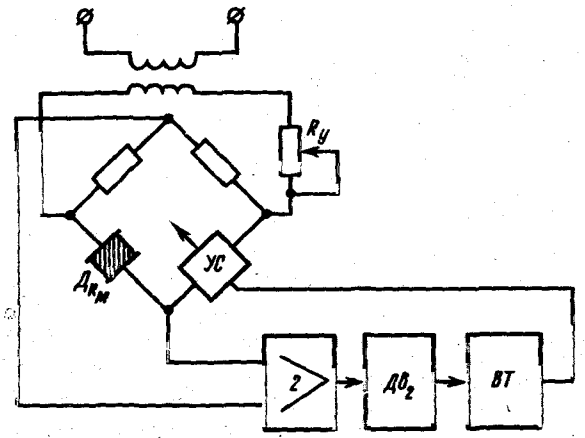


Рис. 3. Схема корректирующей следящей системы

Ко всем элементам устройства не предъявляется требований стабильности, точности или линейности, так как следящая система в любом случае обеспечит равенство сопротивления $R_к$ сопротивлению датчика.

Анализируя работу ЗВС с компенсацией ошибок от некотролируемых параметров в режиме дискретных измерений [3], полагая при этом, что поправка ΔF, вырабатываемая в ЗВС, соответствует определенным, действующим в данный момент времени значениям влажности W материала, его активному сопротивлению $R_м$, давлению на крышку датчика P и всей совокупности других мешающих факторов m_i, и учитывая также возможные отклонения мешающих факторов m_i от их среднестатистических (учтенных при градуировании) значений $m_{iн}$, получим погрешность влагомера с коррекцией по описанному способу

$$\Delta W = \frac{\Sigma m_{io} \frac{\partial \Phi}{\partial m_i} \delta m_i - \frac{\partial \Phi}{\partial R_м} R_{мо} \delta R_м}{\frac{\partial \Phi}{\partial W} + \alpha'(W)} + \frac{\frac{\partial \alpha(W)}{\partial W_p} \Sigma m_i \frac{\partial W_p}{\partial m_i} \delta m_i}{\frac{\partial \Phi}{\partial W} + \alpha'(W)}, \qquad (2)$$

где $\delta R_м$ и δm_i – относительные величины отклонений $R_м$ и m_i, участвующие в образовании погрешности; $R_{м0}, m_{i0}$ – их абсолютные значения; $W_р$ – погрешность от непостоянства уплотнения пробы в датчике, в процентах влажности; $\alpha(W), \alpha'(W)$ – функция преобразования влагомера без коррекции и ее производная; ϕ – характер изменения погрешности на выходе влагомера,

$$\phi = \alpha(W, R_м) - \alpha(W) . \qquad (3)$$

Выражение (2) показывает, из каких составляющих складывается остаточная погрешность компенсации влияния активных потерь и других мешающих факторов на результаты измерений ЗВС при наличии КС. В соответствии с этим можно предпринять меры для минимизации этих составляющих. Так, например, третий член в числителе формулы (2) обуславливает долю погрешности компенсации $W_р$ от непостоянства уплотнения пробы в датчике. Стабилизация давления на крышку датчика сводит эту составляющую к нулю. Первый член в числителе формулы (2) определяет погрешность коррекции из-за наличия мешающих факторов m_i. Практически эта составляющая погрешности также стремится к нулю, так как значение мешающих факторов m_i уже в значительной степени учтено величиной активного сопротивления датчика с материалом $R_м$. С учетом всего этого формула (2) значительно упрощается:

$$\Delta W = - \frac{\frac{\partial \phi}{\partial R_м} R_{м0} \delta R_м}{\frac{\partial \phi}{\partial W} + \alpha'(W)} . \qquad (4)$$

Рассчитаем эффективность коррекции погрешности рассматриваемой ЗВС, т.е. вычислим погрешность ЗВС без коррекции и с коррекцией влияния мешающих факторов. Градуировочная характеристика рассматриваемой системы, полученная на брянских фосфоритах, имеет вид

$$\alpha(W) = 3{,}75W + 0{,}28 \text{ пФ} .$$

При чувствительности 125 Гц/пФ

$$\alpha(W) = 469W + 35 \text{ Гц} ,$$

откуда $\alpha'(W) = 469$ Гц/% влажности.

Перейдем к определению ϕ. В формуле (3)

$$\alpha(W, R_м) = [A + B(R_м)] + [S_{C_м} + S_{R_м}]W , \qquad (5)$$

где $S_{C_м}$ и $S_{R_м}$ – чувствительность ЗВС без коррекции к емкости и активному сопротивлению датчика; $B(R_м)$ – функция, определяющая эквидистантное смещение характеристики $\alpha(W)$ из-за влияния $R_м$ (определяется по способу П.Л.Чебышева из экспериментальной зависимости $F = F(R_м)$, приведенной на рис. 2),

$$B(R_м) = \frac{1250}{0{,}74 R_м - 0{,}28 \cdot 10^{-3} R_м^2} . \qquad (6)$$

Чувствительность ЗВС к $R_м$ определяется как первая производная от $B(R_м)$. Согласно выражению (6),

$$g_{R_м} = \frac{-1250(0{,}74-0{,}56\cdot10^{-3}R_м)}{(0{,}74R_м-0{,}28\cdot10^{-3}R_м^2)^2}.$$

Из формулы (3)

$$\phi = \frac{1250}{0{,}74R_м-0{,}28\cdot10^{-3}R_м^2} + \frac{0{,}7R_м-925}{(0{,}74R_м-0{,}28\cdot10^{-3}R_м^2)^2}W. \quad (7)$$

Из выражения (7) найдем $\partial\phi/\partial R_м$ и $\partial\phi/\partial W$, входящие в формулу (4). Вопрос о том, какая часть сопротивления $\delta R_м$ вызывает погрешность измерений, решается конкретно для каждого материала и для каждого сочетания датчик–измерительная схема. В простейшем случае ответ может быть получен в виде коэффициента корреляции между двумя случайными величинами $R_м$ и W (для случая прямолинейной корреляции) и в виде корреляционного отношения (для случая криволинейной корреляции).

Практика показывает, что в образовании погрешности участвует не менее чем 30%-ное значение $R_м$, т.е. $\delta R_м = 0{,}3$.

Для брянской фосфоритной муки при изменении ее влажности от 0,9% ($R_м$= 200 кОм; $R_{м0}$= 60 кОм; $\delta R_м$= 0,3) до 3,2% ($R_м$= 10 кОм; $R_{м0}$ = = 3 Ком; $\delta R_м$ = 0,3) погрешность ЗВС в абсолютных процентах с коррекцией влияния $R_м$, вычисленная согласно формуле (4), имеет следующие значения:

$$\Delta W_{0,9\%} = 2{,}1\cdot10^{-3}\%$$

$$\Delta W_{3,2\%} = 8{,}97\cdot10^{-3}\%.$$

Очевидно, что погрешность ЗВС без коррекции, отнесенная к выходу измерительной схемы для тех же значений W, $R_м$ и $R_{м0}$,

$$\Delta W = \frac{F(R_к \pm R_{м0}) - F(R_м)}{gC_м}.$$

При W = 3,2% $\Delta W_{3,2\%}$ = (0,08÷0,154)%

при W = 0,9% $\Delta W_{0,9\%} \approx 0{,}008\%$.

Сравнение полученных результатов показывает, что целесообразно применять коррекцию, так как при W= 3,2% погрешность от влияния $R_м$ снижается примерно в 17 раз и при увеличении влажности эффективность коррекции повышается.

При работе замкнутой влагометрической системы с компенсацией активных потерь в режиме непрерывных измерений необходимо учитывать степень соответствия характера их изменения динамическим характеристикам измерительного контура ЗВС и динамическим характеристикам дополнительной корректирующей следящей системы КС. КС вносит поправку в выходной сигнал измерительной электронной схемы не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, определяемым ее быстродействием. Таким образом, в любой момент времени t поправка на текущее значение

$R_м(t)$ вводится в выходной сигнал измерительной схемы в момент времени $t + t_к$ ($t_к$ – время преобразования мешающего фактора в КС), внося тем самым динамическую ошибку коррекции в результат измерения. Дисперсия ошибки компенсации $R_м$ [3]

$$D\Delta R_м = \int_{-\infty}^{+\infty} S R_м(\omega) \left[\left| \frac{\Phi(j\omega)}{\Phi_0} - 1 \right|^2 - 2 \frac{\Phi(-j\omega)}{\Phi_0} \cdot \left(e^{j\omega t_к} - 1 \right) \right] d\omega , \qquad (8)$$

где

$$\Phi(j\omega) = \frac{R'_м(p)}{R_м(p)} ; \qquad \Phi_0 = \frac{R_{м\,г}(p)}{R_м(p)} ;$$

$R_м$ – значение сопротивления датчика, измеренное корректирующей системой и включающее динамическую ошибку; $R_{м\,г}$ – значение сопротивления, определяемое по градуировочной (статистической) характеристике КС.

Из выражения (8) следует, что при определенном сочетании быстродействия $t_к$ КС и вида ее передаточной функции $\Phi(j\omega)$ дисперсия динамической погрешности компенсации $R_м(t)$ имеет минимум. Другими словами, КС должна осуществлять слежение за изменением сопротивления датчика с минимально возможной динамической ошибкой (тогда $\frac{\Phi(j\omega)}{\Phi_0} \approx 1$) и с максимально возможным быстродействием ($t_к \longrightarrow 0$).

Время "запаздывания" поправки к выходному сигналу $t_к$ будет тем меньше, чем быстрее отработает КС возникшее рассогласование от изменения .

При выполнении двух указанных требований ошибка компенсации влияния потерь будет минимальна. Однако степень соответствия возможностей реальной КС поставленным требования зависит от спектральной характеристики $S_{R_м}$ и правильной расчета КС. Реальная ошибка вводимой поправки вычисляется по формуле (8).

Рассчитаем КС, исходя из условий получения максимального быстродействия при минимальной динамической ошибке.

Передаточная функция разомкнутой КС, представленной на рис. 3, имеет вид

$$\Phi(p) = \frac{K}{(T_{эм} p + 1) p} , \qquad (9)$$

где K – коэффициент усиления разомкнутой системы.

С учетом коэффициентов передачи моста $K_м$, усилителя $K_у$, двигателя $K_{дв}$, редуктора $K_р$, вращающегося трансформатора $K_{мвт}$ и управляемого сопротивления $K_{у.с}$

$$K = K_м K_у K_{дв} K_р K_{мвт} K_{у.с} .$$

Регулирование коэффициента K осуществляется в желаемых пределах за счет изменения коэффициента передачи мостовой схемы путем изменения значения управляемого сопротивления УС.

Представим передаточную функцию (9) в виде колебательного звена и определим коэффициент относительного затухания ξ :

$$\Phi(p) = \frac{1}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1}\ ; \qquad \xi = \frac{1}{2\sqrt{KT_{эм}}}\ .$$

Наименьшее время переходного процесса при сохранении его апериодичности обеспечивается при $\xi = 1$, т.е. при

$$2\sqrt{K_{max}T_{эм}} = 1,$$

откуда

$$K_{max} = \frac{1}{4T_{эм}}\ ,$$

где $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени,

$$T_{эм} = T_д\left(1 + K_р^2\frac{I_н}{I_д}\right).$$

При использовании в КС двигателя РД-09 с редукцией 1/15,62 ($K_р = 0,064$), соединенного с ротором ВТ (момент инерции $J_н = 2,5$ г·см·с^2), и при отсутствии трущихся частей в кинематике рассматриваемой системы

$$T_{эм} = 0,0266\left(1+0,064^2\frac{2,5}{0,0266}\right) = 3,68\cdot10^{-2}\text{с}\ ,$$

откуда

$$K_{max} = \frac{1}{4\cdot3,68\cdot10^{-2}} = 6,8\ 1/\text{с}\ .$$

Коэффициенты передачи составных элементов рассматриваемой КС:

$K_у = 5\cdot10^5$; $K_{дв} = 6,28$ рад/(В·с); $K_р = 0,064$;

$K_{у.с} = \frac{R_{Kmax}}{U_{см}} = \frac{1\cdot10^5}{4,5} = 2,22\cdot10^4$ Ом/В; $K_{мвт} = \frac{U_{см}}{\alpha} = \frac{4,5}{2,1} = 2,2$ В/рад.

Максимальный коэффициент передачи мостовой схемы

$$K_{м\,max} = 0,7\cdot10^{-9}\ \text{В/Ом}.$$

Практически величина $K_м$ берется процентов на 10–20 меньше расчетной (из-за влияния неучтенных факторов на устойчивость КС). Принимаем $K_м = 0,5\cdot10^{-9}$ В/Ом.

При расчете быстродействия КС нужно иметь в виду два режима работы системы: режим отработки больших и резких изменений $R_м$ и режим отработки сравнительно малых (до 5% от максимального) отклонений $R_м$. В первом случае усилитель КС некоторое время работает в режиме насыщения, а затем – на линейной части характеристики. Второй случай соответствует только линейному преобразованию усилителем входного сигнала.

Рассмотрим первый, более общий случай и воспользуемся методикой расчета быстродействия приборной следящей системы, предложенной Ф.Ф.Котченко [1].

Определим время отработки системой максимального входного сигнала, проводя следующие вычисления. Зона линейности (в относительных единицах)

$$\varphi_д = \frac{U_д\sqrt{\frac{J_н}{J_д}}}{K_м K_{дв} K_{мг} K_{ус} U_{у\,max}} = \frac{0{,}2\cdot10^{-3}\sqrt{\frac{2{,}5}{0{,}032}}}{0{,}5\cdot10^{-9}\cdot6{,}28\cdot2{,}2\cdot2{,}22\cdot10^{4}\cdot50} = 0{,}23,$$

где $U_{у\,max} = 50$ В – напряжение на управляющей обмотке двигателя при насыщенном усилителе; $U_д = 0{,}2\cdot10^{-3}$ В – уровень входного сигнала, насыщающего усилитель.

Обозначим

$$\beta = \frac{U_д}{U_{к\,max}} = \frac{0{,}2\cdot10^{-3}}{7\cdot10^{-3}} = 0{,}0286 \quad ,$$

где $U_{к\,max} = 7\cdot10^{-3}$ В – входное напряжение усилителя при максимальном отклонении $R_м$ от значения, при котором мостовая схема уравновешена.

Максимальное значение значение зоны линейности

$$\varphi_{max} = \frac{0{,}23}{0{,}0286} = 8{,}1 \quad .$$

Время отработки системой скачкообразного отклонения на максимальную величину (200 кОм)

$$t_{к\,max} = \frac{\varphi_{max}}{K_р\cdot\sqrt{\frac{J_н}{J_д}}} \quad .$$

Быстродействие КС

$$T_д = \frac{8{,}1}{0{,}064\sqrt{\frac{2{,}5}{0{,}032}}} \quad .$$

Практически таких колебаний $R_м$ при контроле влажности реальных продуктов обогащения не бывает. Этот случай взят как предельный для оценки качества следящей системы. Во влагометрии мы встречаемся обычно с монотонным изменением $R_м$, поэтому погрешность коррекции и дисперсия ее невелики. Как показали расчеты, быстродействие КС в 11–20 раз выше быстродействия измерительного контура ЗВС (время пробега кареткой всей шкалы 5–8 с). Поэтому можно утверждать, что введение КС в ЗВС не требует дополнительных мероприятий по стабилизации системы.

Литература

1. Котченко Ф.Ф. Следящие системы автоматических компенсаторов. Л., "Недра", 1965.

2. Кричевский Е.С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых. М., "Недра", 1972.

3. Проскуряков Р.М. Исследование замкнутых систем автоконтроля при обогащении полезных ископаемых. – Автореф. канд.дисс., изд. ЛГИ, 1971.