Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1985, т. 106

УДК 551.508

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОВАКУУМНОГО ВЛАГОМЕРА

Р.М.ПРОСКУРЯКОВ, А.Г.ВОЛЧЕНКО

При измерении влажности термовакуумным методом определяется изменение температуры пробы в процессе десорбции влаги в вакууме. В случае небольшой влажности $w < 2$–3 % зависимость максимальной величины изменения температуры пробы выражается уравнением регрессии [4]

$$\theta_м = S_w w + \theta_0 ,$$

где S_w – чувствительность первичного преобразователя, К/%; θ_0 – коэффициент регрессии, вызванный смещением градуировки термовакуумного метода относительно термогравиметрического, К.

Процесс измерения влажности термовакуумным влагомером при начальной температуре пробы $T(0)$, равной температуре стенок камеры, можно описать алгоритмом

$$u_w = K_w \max\left\{1(t-\tau_з)\left[T(t)-T(0)\right]\right\} + u_0 ,$$

где u_w – сигнал, пропорциональный влажности, В; t – время, с; K_w – чувствительность, В/К; $T(t)$ – температура пробы в процессе десорбции, К; $\tau_з$ = 5–20 – время задержки, с; t = 0 – начало вакуумирования:

$$1(t) = \begin{cases} 0; & t < 0 \\ 1; & t \geq 0 \end{cases};$$

$$K_w = R_t \alpha_R I_R S_w ; \qquad u_0 = \theta_0 K_w ;$$

R_t – номинальное сопротивление термочувствительного элемента (ТЧЭ), Ом; α_R – температурный коэффициент сопротивления, $К^{-1}$; I_R – ток ТЧЭ, А.

При анализе источников погрешностей вторичного измерительного преобразователя основное внимание будет уделено схеме начального уравновешивания и нестабильности коэффициента передачи (чувствительности). Выбор схемы начального уравновешивания обусловлен диапазоном измеряемой влажности и максимально допустимой погрешностью. Для измерительных преобразователей с электромеханическим следящим приводом [5] найдено [2], что основным источником погрешности является гистерезис двигателя и дискретность потенциометра [3]. Погрешность, вызванная гистерезисом, составляет от 0,1 до 0,5 % динамического диапазона

$$\Delta w_г = (1 \div 5)\cdot 10^{-3} \frac{T_{max} - T_{min}}{S_w} , \qquad (1)$$

где T_{max} и T_{min} – максимальная и минимальная температура пробы, К.

Погрешность имеет дискретное распределение и в диапазоне 285–335 К ее можно характеризовать абсолютной погрешностью, равной 0,03–0,05 % для аммофоса, 0,02–0,03 % – для нитроаммофоски и $\Delta w_r < 0{,}01$ % массовой влажности для хлористого калия.

Дискретность намотки потенциометра следящей системы является вторым источником погрешности. Эта погрешность имеет равномерный закон распределения и среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_д = 0{,}58 \frac{T_{max} - T_{min}}{2NS_w}. \qquad (2)$$

В указанном температурном диапазоне и при числе ступеней (витков намотки) потенциометра $N = 500$ (для ПТП-2) среднеквадратическое отклонение равно 0,025, 0,016 и 0,005 % соответственно для аммофоса, нитроаммофоски и хлористого калия.

Погрешность схем уравновешивания на основе дискретной матрицы резисторов или АЦП, в том числе и с применением микропроцессора, определяется выражением (2), где $N = 2^n$ и n – число двоичных разрядов. Стандартные микропроцессоры с разрядностью 8 имеют погрешность компенсации начальной температуры для указанных удобрений соответственно 0,05, 0,03 и 0,01 % массовой влажности. При работе с двойной точностью возможно применение 10 и 12 разрядных АЦП, при этом среднеквадратическая погрешность не превышает 0,01 % для любого из указанных удобрений.

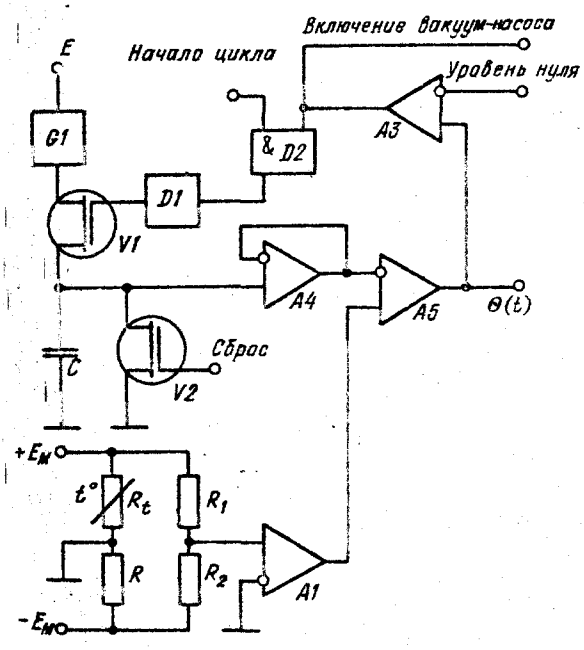


Рис.1. Измерительный преобразователь с программным уравновешиванием
$G1$ – генератор тока; $D1$ – схема согласования потенциала

Во вторичном измерительном преобразователе с программным уравновешиванием [2] элементом памяти служит высокодобротный конденсатор (рис.1), подключенный посредством МОП ключей к источнику тока. В этой схеме следует учитывать дрейф МОП ключей и запаздывание в цепях сравнения и управления $V1$, временной дрейф схемы хранения.

Временной дрейф схемы хранения на операционных усилителях с полевым входом не превышает $2 \cdot 10^{-6}$ $с^{-1}$, то есть 4 % от измеряемой величины в час для конденса-

тора емкостью I мкФ. Влияние временного запаздывания можно уменьшить, увеличив время развертывания. Для компаратора с временем нарастания выходного напряжения I-2 В/мкс общее время запаздывания от 30 до 50 мкс, что при допустимой погрешности $2 \cdot 10^{-4}$ от диапазона изменения начальной температуры определяет минимальное время развертывания от I50 до 250 мс при линейном нарастании напряжения на конденсаторе. При замене токостабилизирующего двухполюсника резистором $R_{ст}$ его выбирают из условия

$$R_{ст} > \frac{u_E t_{min}}{u_{max} C}, \qquad (3)$$

где u_E – напряжение источника заряда, В; u_{max} – напряжение на конденсаторе при минимальной начальной температуре пробы, В; C – емкость конденсатора памяти, мкФ; t_{min} – минимальное время развертывания, мс.

При отношении u_E/u_{max} = I,I-I,3 время развертывания превышает t_{min} в I,5-2 раза. Выражение (3) выведено из условия, что максимальный ток заряда не превышает ток $G1$. Для влагомера ТВВ-6 [3] u_E/u_{max} = I,3, а время развертывания от 0 до 5 В не превышает I,2 с.

Наибольшую погрешность в процессе измерения вносит ток утечки МОП ключей, приводящий к дрейфу запоминающего напряжения от 0,2 до 0,34 мВ/с. При среднем времени измерения влажности в диапазоне до I,2 % (готовые минеральные удобрения), равном 60 с, дрейф ключей приводит к систематической погрешности от 0,06 до 0,I % массовой влажности для аммофоса и 0,04-0,07 % для нитроаммофоски. Эта погрешность учитывается при градуировке, однако вариации времени измерения приводят к случайной погрешности, суммирующейся с основной. При 30 % вариации времени измерения (σ = 8,7 с) погрешность аддитивная и характеризуется среднеквадратической погрешностью 0,0I-0,026 % для аммофоса, 0,0I7 % для нитроаммофоски. Для удобрений хлористый калий и апатитовый концентрат с S_w > 6 К/%, эта погрешность пренебрежимо мала.

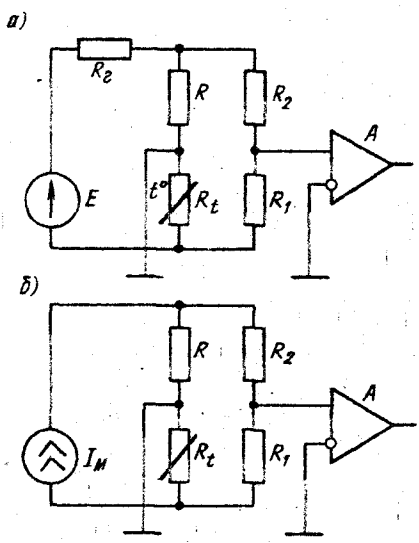


Рис.2. Измерительный мост с питанием от источника напряжения (а) и тока (б)

В случае измерения влажности лекарственных препаратов с наполнителями из глюкозы или крахмала время измерения достигает 300 с, а чувствительность датчика лежит в пределах от 0,I до I,4 К/%. Эта погрешность становится определяющей. Одной из мер, предотвращающей влияние дрейфа МОП ключей является дублирование их последовательными контактами электромеханического реле.

Нестабильность коэффициента передачи складывается из нестабильности коэффициента передачи и дрейфа нуля масштабного

усилителя AI, нелинейности термочувствительного элемента и схемы преобразования сопротивления в напряжение. Влияние дрейфа нуля устраняется компенсацией напряжения разбаланса перед каждым измерением, для чего масштабный усилитель включается между усилителем следящей системы и измерительным мостом [I], аналогичное решение применено также во влагомере ТВВ-6.

Измерительный мост (рис.2,а) в термовакуумном влагомере работает на высокоомный вход операционного усилителя и его можно рассматривать как ненагруженный. Для обобщения результатов анализа линейности моста мы введем безразмерные коэффициенты

$$a_0 = \frac{R_{t_0}}{R_{t_0}+R}; \quad b = \frac{R}{R_{t_0}+R}; \quad k = \frac{R_{t_{max}}}{R_{t_{max}}+R}; \quad l = \frac{R_1+R_2}{R+R_{t_0}};$$

$$a = a_{max} - \Delta r; \quad \Delta r = \alpha_R a (T - T_0); \quad R_2 = m(R+R_{t_0}),$$

где R_t, R, R_1, R_2, $R_г$ – сопротивления резисторов на рис.2; R_{t_0} – сопротивление ТЧЭ при T_0 = 293 К, Ом; $R_{t_{max}}$ – сопротивление ТЧЭ при $T = T_{max}$, Ом.

В диапазоне 288–333 К относительное изменение сопротивления ТЧЭ $\Delta r / a_0$ = 0,I8. Для моста, питаемого от источника напряжения ($R_г$ = 0),

$$u(T) = E_м \left(\frac{a+\Delta r}{b+a+\Delta r} - k \right). \qquad (4)$$

С ростом a_0 погрешность такого моста растет с 4 % (a = 0,25) до II,1 % (a = 0,75), столь большая нелинейность не позволяет рекомендовать эту схему для измерения приращения температуры, в том числе и в термовакуумных влагомерах.

При питании моста от источника тока (рис.2,б) выходное напряжение моста равно

$$u(T) = I_м (R+R_{t_0}) \frac{a+b}{a+b+l} \left(\frac{a}{a+b} - k \right). \qquad (5)$$

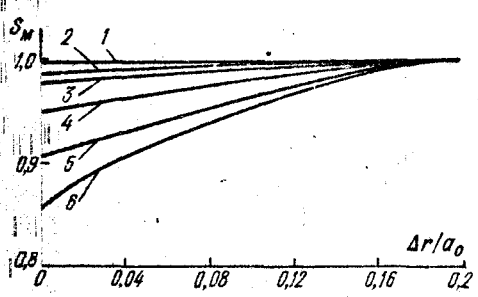


Рис.3. Зависимость чувствительности моста от величины R_t для моста по схеме 2,б при l = 10 – кривые *1–3* и l = 1 – кривые *4–5* для a = 0,25 – кривые *1, 4*; a = 0,5 – кривые *2, 5*; a = 0,75 – кривые *3, 6*

При изменении l от I до IO (a = = 0,5) нелинейность снижается с IO до I,5 % (рис.3).

По своим характеристикам мост с питанием через последовательный резистор занимает промежуточное положение между схемами с питанием от источников тока и напряжения, выходное напряжение такого моста равно

$$u(T) = \frac{(a+b)l}{(a+b)l+(a+b+l)m} \left(\frac{a}{a+b} - k \right). \qquad (6)$$

Величина чувствительности моста S_w во всех этих схемах считалась

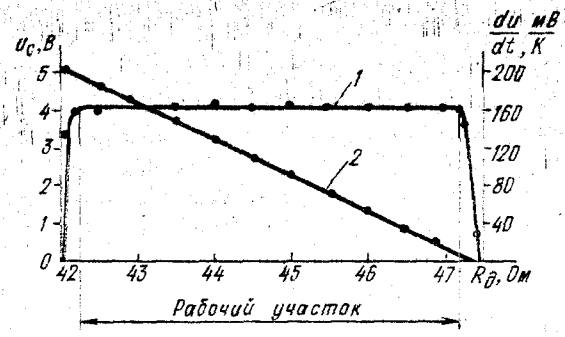


Рис.4. Напряжение на конденсаторе (1) и чувствительность (2) измерительного преобразователя ТВВ-6

как отношение приращений $u(T)$ и $\Delta r/a_0$ и нормировалось по S_{max}. Схему по рис.2,б целесообразно применять при $m < 3$-5 и $l > 5$-10. В этом случае величина относительной погрешности, равной 1,5-2,5 % (при $a_{max} < 0,3$), будет в 3-4 раза меньше методической.

Питание моста через резистор применялось в ТВВ-6, в котором для начального уравновешивания использовалась схема хранения на конденсаторе (см. рис.1). На рис.4 приведены экспериментальные характеристики указанной схемы, дрейф хранимого напряжения не превышает 20 мВ/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. № 757853. Устройство для измерения влажности / А.Г.Волченко, Е.С.Кричевский, Р.М.Проскуряков. – Опубл. в Б.И., 1980, № 31.

2. Волченко А.Г. Разрешающая способность автоматизированных термовакуумных влагомеров. – Зап. ЛГИ, 1978, т.77.

3. Волченко А.Г., Кричевский Е.С. Термовакуумный влагомер ТВВ-6. – В кн.: Новые методы и технологические средства измерения влажности. Ташкент, Изд-во ТПИ, 1982.

4. Волченко А.Г., Кричевский Е.С., Проскуряков Р.М. Оценка точности термовакуумного метода измерения влажности. – Измерительная техника, 1980, № 3.

5. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Под общ. ред. Е.С.Кричевского. М., Энергия, 1980.