

*А. А. Кольцов, Г. Х. Валеева*

## РАСЧЕТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ

Электронные автоматические потенциометры являются широко распространенными приборами, однако расчет их измерительных схем по [1], [2] наталкивается на определенные трудности.

Дело заключается в том, что некоторые расчетные формулы в [1], [2] либо неправильны (это может быть, конечно, следствием опечаток), либо чрезмерно сложны [1]. Расчет по [1] и [2] не позволяет избежать подгонки шкалы после изготовления схемы по данным расчета. В [1] и [2] имеются неправильные выводы о температурной погрешности схем, т. к. не учитывается нелинейность начального участка характеристик термопар. Все это привело к разработке новой методики расчета двух основных измерительных схем рис. 1 и 2.

На схемах рис. 1 и 2 реохорд  $R_p$  с шунтами  $R_{ш1}$  и  $R_{ш2}$  (см. приложение, 1) показан в виде эквивалентного реохорда. Рабочий участок эквивалентного реохорда обозначен через  $R_{\text{эpp}}$ , а нерабочие участки — через  $\beta R_{\text{эpp}}$  и  $\gamma R_{\text{эpp}}$ ; общее сопротивление  $R_{\text{эр}}$  эквивалентного реохорда, измеряемое между точками 1 и 2, равно

$$R_{\text{эр}} = R_{\text{эpp}} (1 + \beta + \gamma), \quad (1)$$

причем

$$\frac{1}{R_{\text{эр}}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{ш1}} + \frac{1}{R_{ш2}}$$

В первой схеме (фиг.1) рабочий ток  $I_2$  поддерживается постоянным посредством сравнения падения напряжения  $U_{\text{св}}$  на постоянном сопротивлении  $R_{\text{ст}}$  (манганин)

$$R_{\text{ст}} = I_2 R_{\text{ст}} \quad (2)$$

с э. д. с. нормального элемента  $E_{\text{нэ}}$ . Температурная компенсация осуществляется сопротивлением  $R_{\text{к1}}$  (медь, никель). Изменение

величины термочувствительного сопротивления  $R_{к1}$  приводит к изменению рабочего тока  $I_1$  т. к. восстановление величины рабочего тока  $I_2$  происходит за счет изменения напряжения  $U_{сд}$  с помощью реостата  $R_B$ .

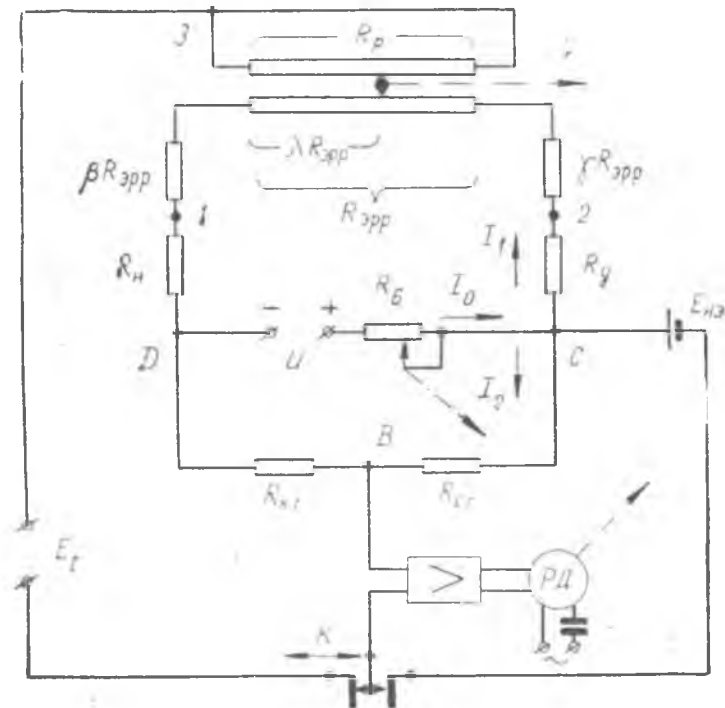


Рис. 1. Схема с контролем рабочего тока  $I_1$ .

Во второй схеме (фиг. 2) поддерживается постоянным рабочий ток  $I_1$  посредством сравнения напряжения  $U_{сд}$  на диагонали питания моста

$$U_{сд} = I_1 (R_n + R_{эп} + R_g), \quad (3)$$

где

$$R_n + R_{эп} + R_g = \text{const (манганин)},$$

с э. д. с.  $E_{нэ}$  нормального элемента.

Изменение величины термочувствительного сопротивления  $R_{к1}$ , осуществляющего температурную компенсацию, приводит к изменению рабочего тока  $I_2$ .

Т. о., общим для схем фиг. 1 и 2 является непостоянство одного из двух рабочих токов потенциометра при изменении темпера-

туры прибора. В первой схеме это приводит к некоторому изменению предела измерения прибора, что является недостатком. Во второй схеме такое изменение отсутствует, однако коммутация входной цепи электронного усилителя получается более сложной, чем в первой схеме. Это и объясняет преимущественное распространение первой схемы, хотя она и имеет отмеченный выше недостаток.

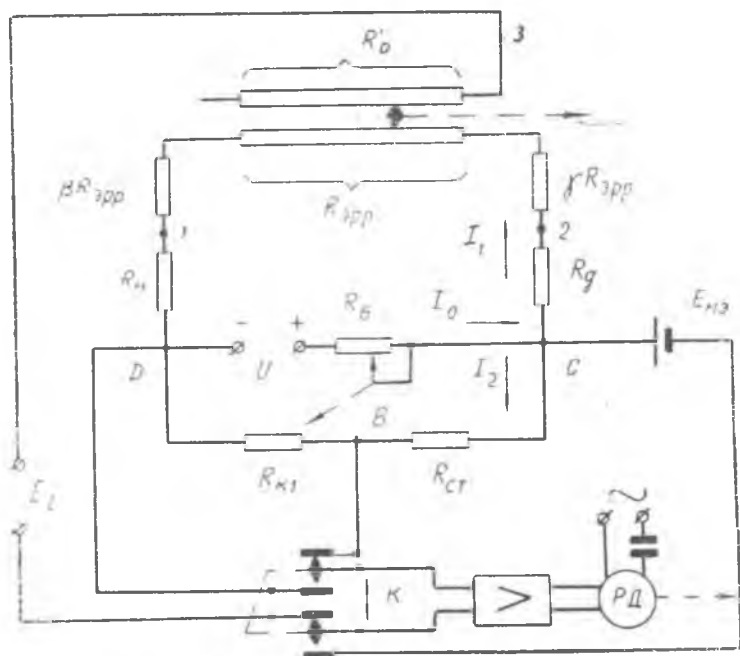


Рис. 2. Схема с контролем рабочего тока  $I_2$ .

В условиях цехов КИП и автоматики заводов приходится производить перерасчет измерительных схем приборов, при этом пределы измерения часто выбираются довольно низкими (порядка  $50^{\circ}\text{C}$ ). Существующие методики расчета не позволяют правильно оценить величину температурной погрешности и даже ориентируют читателя на возможность полной температурной компенсации, якобы осуществляемой в некоторых схемах, что неправильно. Эти методики [1], [2] указывают, что величина сопротивления  $R_{к1}$  определяется при градуировочной температуре, что также неправильно. Результаты расчета по [1], [2] поэтому таковы, что подгонка шкалы прибора неизбежна, а температурная компенсация получается неполной.

Исходными данными к расчету являются следующие.

1. Градуировочная таблица терморпары.
2. Пределы  $t_n$ ,  $t_k$  шкалы прибора и соответствующие им

т. э. д. с.  $E_n$  (начало шкалы) и  $E_k$  (конец шкалы), а также предел  $E_n$  измерения прибора по напряжению

$$E_n = E_k - E_n. \quad (4)$$

3. Э. д. с.  $E_{нЭ}$  нормального элемента.

4. Сопротивление  $R_{ср}$  стандартного реохорда (реохорд  $R_p$  с первым шунтом  $R_{ш1}$ ) и коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$ . Величины  $R_{ср}$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  должны быть определены экспериментально, если регулировка шкалы нежелательна.

5. Длительно допустимый ток  $I_0$  источника питания или один из рабочих токов ( $I_1$  или  $I_2$ ).

6. Т. к. с.  $\alpha$  материала (медь, никель) термочувствительного сопротивления  $R_{к1}$ .

7. Температуры  $t_1$  и  $t_2$  свободных концов термопары, а также соответствующие этим температурам т. э. д. с.  $E_1$  и  $E_2$ , определяемые по градуировочной таблице термопары (см. приложение, 2). Температура  $t_1$  является номинальной и должна соответствовать  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  (по ГОСТ 7164—58).

8. Максимально возможное напряжение  $U_{\max}$  источника  $U$  питания схемы.

9. Сопротивление токосъемного реохорда  $R_p$  и способ его включения.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Величины, определяемые в результате расчета, обеспечивают отсутствие погрешности при номинальной температуре прибора без какой бы то ни было подгонки схемы. Возможно два основных варианта расчета.

А. Случай, когда задан ток  $I_0$ .

Определяется крутизна  $C$  характеристики термопары

$$C = \frac{E_2 - E_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

и вспомогательная величина  $M$

$$M = 0,5E_n + E_n - E_1. \quad (6)$$

Вычисляется коэффициент  $\gamma_1$  для первой схемы

$$\gamma_1 = \frac{\alpha E_1 + C}{\alpha E_{нЭ} - [C + \alpha(E_n + 0,5E_n)]} \quad (7)$$

или для второй — берется минимальный корень уравнения

$$\gamma_1^2 \left[ 1 + \frac{\alpha(t_2 - t_1)}{1 + \alpha t_1} \right] + \gamma_1 \left[ 2 + \frac{\alpha(t_2 - t_1)}{1 - \alpha t_1} - \frac{\alpha E_{нЭ}}{C(1 + \alpha t_1)} \right] + 1 = 0. \quad (8)$$

Находится рабочий ток  $I_2$

$$I_2 = \frac{I_0}{M} \left[ \sqrt{(M + \gamma_1 E_{нЭ}) \gamma_1 E_{нЭ}} - \gamma_1 E_{нЭ} \right]. \quad (9)$$

Примечание. Если  $M=0$ , то  $I_2=I_1=0,5 I_0$ . Определяется сопротивление

$$R_{CT} = \frac{E_{HЭ}}{I_2}. \quad (10^*)$$

Здесь и в дальнейшем звездочка у номера формулы означает, что определяемая величина для второй схемы получится, если э. д. с.  $E_{HЭ}$  входящую в формулу, разделить на  $(1+\eta)$ .

Вычисляется величина термочувствительного сопротивления  $R_{к1}$  (при температуре  $t_1$ )

$$R_{к1} = \gamma R_{CT}. \quad (11)$$

Находится рабочий ток  $I_1$

$$I_1 = I_0 - I_2. \quad (12)$$

Вычисляются сопротивления

$$R_{эpp} = \frac{E_{II}}{I_1}; \quad (13)$$

$$R_{II} = \frac{E_{HЭ} - E_{II} - E_1 - E_2 - E_{II}}{I_1}; \quad (14^*)$$

$$R_g = \frac{E_{HЭ} - E_1 - E_2 - E_{II}}{I_1}; \quad (15^*)$$

$$R_{ш2} = \frac{R_{сп} R_{эpp} (1 - \beta - \gamma)}{R_{сп} R_{эpp} (1 - \beta - \gamma)}. \quad (16)$$

Определяется минимальное напряжение источника питания схемы

$$U_{min} = (1 + \gamma) E_{HЭ}. \quad (17^*)$$

Вычисляется сопротивление реостата  $R_B$

$$R_B = \frac{1,2 U_{max} - U_{min}}{I_0}. \quad (18)$$

а при необходимости и среднее сопротивление измерительной схемы

$$R_{ис} \approx 0,5 R_{эpp} + R_{II} + R_{к1}. \quad (19)$$

В сопротивление  $R_{II}$  иногда включают [1] и сопротивление токосъемного реохорда, средняя величина которого определяется для случая, показанного на фиг. 1 (токосъемный реохорд замкнут), по формуле

$$R_r = 0,25 R_p', \quad (20)$$

а для случая, показанного на фиг. 2 (токосъемный реохорд разомкнут), по формуле

$$R_r = 0,5 p'. \quad (21)$$

Схема включения токосъемного реохорда, показанная на рис. 1, предпочтительнее, т. к. максимальная величина  $R_T$  получается в 4 раза меньше, чем для случая рис. 2.

Б. Случай, когда задан рабочий ток  $I_1$  (или  $I_2$ )

Используются формулы (5)... (8), затем по отношению

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{M}{\sqrt{(M + \eta E_{НЭ}) \eta E_{НЭ} - \eta E_{НЭ}}} - 1 \quad (22)$$

определяется ток  $I_2$  (или  $I_1$ ). После этого применяются формулы (10)... (21), причем выражение (12) используется для определения тока  $I_0$ .

Примечание. Если  $M = 0$ , отношение рабочих токов равно 1.

### П Р И Л О Ж Е Н И Е

1. Для определения коэффициентов  $\beta$  и  $\gamma$  в цепи реохорда  $R$  с шунтами (а также с одним шунтом или вообще без шунтов), создается, например, с помощью источника регулируемого напряжения типа ИРН, допустимый по условиям самонагрева и постоянный по величине ток  $I$ , контролируемый миллиамперметром  $mA$  (рис. 3).

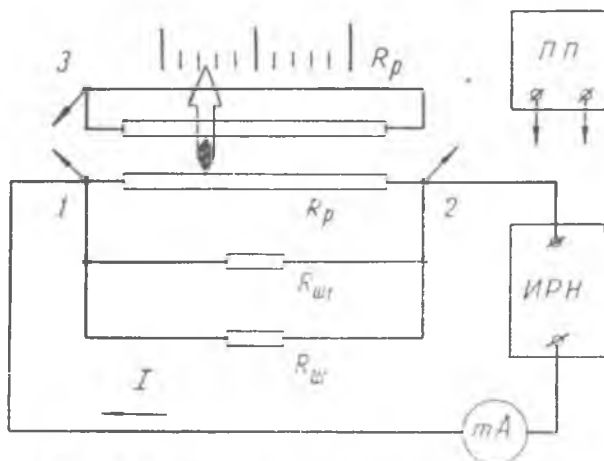


Рис. 3. К определению коэффициентов  $\beta$  и  $\gamma$ .

Контактный ролик устанавливается в начальное положение (стрелка прибора указывает на начало шкалы) и компенсатором (потенциометром) типа ПП измеряются напряжения  $U_{31н}$  и  $U_{32н}$ . Затем контактный ролик устанавливается в конечное положение (стрелка прибора указывает на конец шкалы) и тем же прибором ПП измеряются напряжения  $U_{31к}$ ,  $U_{32к}$ . Величины  $\beta$  и  $\gamma$  определяются по формулам:

$$\beta = \frac{1}{\frac{U_{31к}}{U_{31н}} - 1}; \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{1}{\frac{U_{32н}}{U_{32к}} - 1}. \quad (24)$$

Следует учесть, что величины  $\beta$  и  $\gamma$  из-за наличия технологических допусков на изготовление реохорда  $R_p$  и точность его монтажа в приборе могут несколько изменяться от экземпляра к экземпляру.

2. Наглядное изображение температурной погрешности схемы фиг. 1 показано на фиг. 4, где цифрой I обозначена характеристика терморпары, а цифрой II — прямая, уравнение которой

$$U_i = E_i + C(t_i - t_1), \quad (25)$$

где  $t_i$  — температура прибора.

Прямая II является по сути дела характеристикой схемы для случая  $\lambda = 0,5$

$$\lambda = \frac{E_x - E_n}{E_n}, \quad (26)$$

где  $E_x$  — измеряемая т. э. д. с.

Положение прямой II, которая должна возможно лучше аппроксимировать кривую I, определяется величинами  $t_1$  и  $t_2$ . Изменение величины  $E_x$  от  $E_n$  ( $\lambda = 0$ ) до  $E_x$  ( $\lambda = 1$ ) приводит к изменению положения прямой II, занимающей в пограничных случаях положение прямых III.

Абсолютная температурная погрешность  $\delta_{\lambda,0,5}$  схемы при произвольной температуре  $t_i$  прибора и  $\lambda = 0,5$  изображается заключенным между линиями I и II отрезком перпендикуляра, восстановленного к оси абсцисс в точке  $t_i$ . Величина погрешности в заштрихованной области отрицательна. Изменение  $\lambda$  изменяет и величину  $\delta$ ; так, при  $\lambda = 0$   $\delta_{\lambda 0} > \delta_{\lambda 0,5}$  причем (фиг. 3)

$$n = 0,5 E_n \gamma (1 + \gamma)^{-1} \alpha (t_i - t_1). \quad (27)$$

Абсолютная температурная погрешность второй схемы практически соответствует величине  $\delta_{\lambda 0,5}$  первой схемы, хотя, строго говоря, компенсирующее напряжение, создаваемое второй схемой, нелинейно зависит от  $t_i$ . Однако не будет большой ошибкой считать, что  $U_i$  для второй схемы определяется формулой (25).

Рис. 4 наглядно показывает, как велика бы стала температурная погрешность схемы, если принять за температуры  $t_1$  и  $t_2$  граничные значения возможной температуры прибора, как то рекомендуется в [1] и [2]. Прямая II в этом случае прошла бы через

точки О и А. Это привело бы к неизбежной регулировке шкалы прибора (при градуировочной температуре прибор давал бы большую погрешность) и к не вполне приемлемой температурной компенсации, т. к. значение  $C$  не было бы оптимальным. Можно

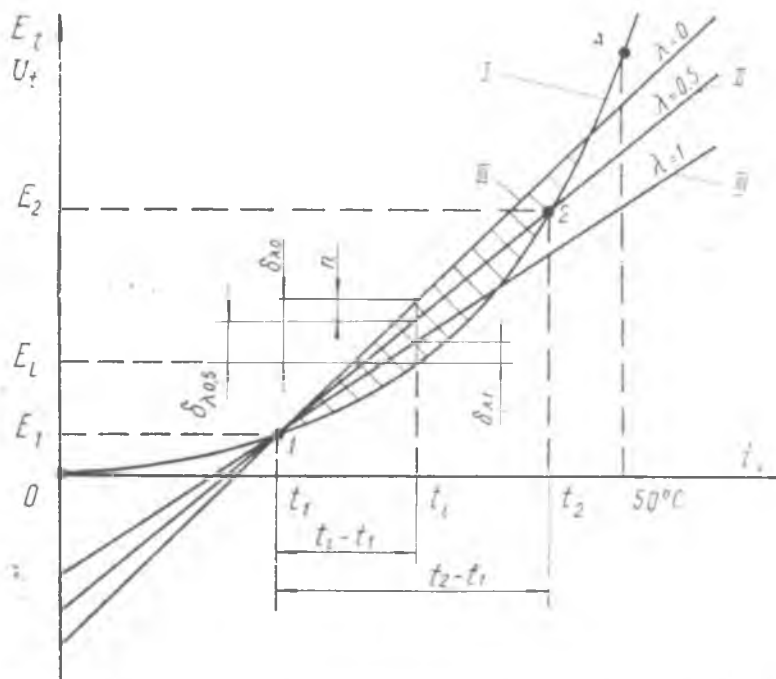


Рис. 4. К определению температурной погрешности схем фиг. 1 и фиг. 2.

рекомендовать следующие значения  $t_1$  и  $t_2$ : для термопар ХК  $t_1 = 18^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 30^\circ\text{C}$ ; для термопар ХА  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 40^\circ\text{C}$ ; для термопар ПП  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 30^\circ\text{C}$ .

Величина приведенной температурной погрешности  $\gamma_t$  может быть определена и аналитически. Для первой схемы

$$\gamma_t = \left[ \frac{E_i - E_1}{E_{II}} - \frac{\gamma_a(t_i - t_1)}{(1 + \gamma_i)(1 + \alpha t_1)} \left( 1 - \gamma + \frac{E_{HЭ} - E_1}{E_{II}} \frac{E_K}{E_{II}} \right) \right] 100\%, \quad (28)$$

для второй схемы

$$\gamma_t = \left[ \frac{E_i - E_1}{E_{II}} - \frac{\gamma_a(t_i - t_1) E_{HЭ}}{(1 + \gamma_i) [(1 + \gamma_i)(1 + \alpha t_1) + \gamma_a(t_i - t_1) E_{II}]} \right] 100\%. \quad (29)$$

### ВЫВОДЫ

1. Учет сопротивления нерабочих участков реохорда посредством выражения их величины через сопротивление рабочего участка реохорда (а не всего реохорда, как в [1], [2]) позволяет экспе-



риментально определять величины  $\beta$  и  $\gamma$ , упростить некоторые расчетные формулы и отразить существующую разницу в сопротивлениях нерабочих участков, что не делается в [1] и [2]. Неучет истинной величины сопротивления нерабочих участков реохорда и их неравенства является одной из причин неизбежной подгонки схем, рассчитанных по [1] и [2].

2. Учет нелинейности начального участка характеристик терморпар выявляет существенные температурные погрешности схем, не учитываемые в [1] и [2]. Эти погрешности могут быть особенно велики для приборов с низким пределом измерения, что легко определить по приводимым в настоящей статье формулам.

3. Правильный выбор участка характеристики терморпар для определения расчетного значения крутизны характеристики позволяет минимизировать температурную погрешность схем. В [1] и [2] рекомендуется брать этот участок соответствующим всему температурному диапазону работы прибора, что приводит к отклонению от условий оптимальной температурной компенсации, а также к необходимости подгонки схемы.

4. Формулы для определения  $\eta$ ,  $I_2$ ,  $R_{ис}$ ,  $\frac{I_1}{I_2}$ , приводимые в статье, отличаются от аналогичных в [1], [2] тем, что они правильны. Можно отметить, что выражение для  $\eta$  второй схемы в [1] неправильно, а в [2] — неточно. Формула для  $R_{ис}$  в [1] сложна и не приводит к правильным результатам. Выражение для  $\frac{I_1}{I_2}$  в [1] также сложно, хотя и правильно.

5. По тексту [1], [2] величина  $R_{к1}$  должна бы определяться для градуировочной температуры, однако в действительности этого нет, что приводит либо к дополнительным расчетам, либо к необходимости подгонки схемы. В изложенной методике величина  $R_{к1}$  определяется для градуировочной температуры  $t_1$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Воронков. Расчет измерительных схем автоматических приборов. Приборостроение, 7, 1957.

2. Тао Ли-Тен. К вопросу о расчете измерительных схем автоматических потенциометров, работающих с терморпарой. Приборостроение, 8, 1963.