

А. А. Кольцов, Д. Н. Карбанов

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ УРАВНОВЕШЕННЫХ МОСТОВ

Широкое распространение получили электронные автоматические уравновешенные мосты с трехпроводной линией связи. Измерительная схема мостов, аналогичных ЭМП, показана на рис. 1; мосты, подобные ЭМД, отличаются только тем, что в их измерительной схеме $R_1=0$.

В Уфимском нефтяном институте разработана новая измерительная схема (рис. 2) симметричного электронного автоматического уравновешенного моста [1].

Методика точного расчета измерительных схем типа рис. 1 изложена в [2]. Сопротивления измерительных схем рис. 1 и рис. 2 могут быть определены по формулам таблицы 1, где обозначено:

- $P_{x \max}$ — максимально допустимая мощность преобразователя (например, термометра сопротивления);
- R — характеристическое сопротивление моста;
- $R_{x \min}$ — минимальное сопротивление преобразователя;
- ΔR_m — максимальное приращение сопротивления преобразователя;
- R_λ — сопротивление провода линии связи;
- $R_{\text{эpp}}$ — сопротивление рабочего участка эквивалентного реохорда;
- $R_{\text{эpn}}, R_{\text{эрк}}$ — сопротивления нерабочих участков эквивалентного реохорда, примыкающих к началу n и концу k шкалы;
- β, γ — коэффициенты [2], определяющие величины сопротивлений $R_{\text{эpn}}, R_{\text{эрк}}$

$$\beta = \frac{R_{\text{эpn}}}{R_{\text{эpp}}}; \quad \gamma = \frac{R_{\text{эрк}}}{R_{\text{эpp}}};$$

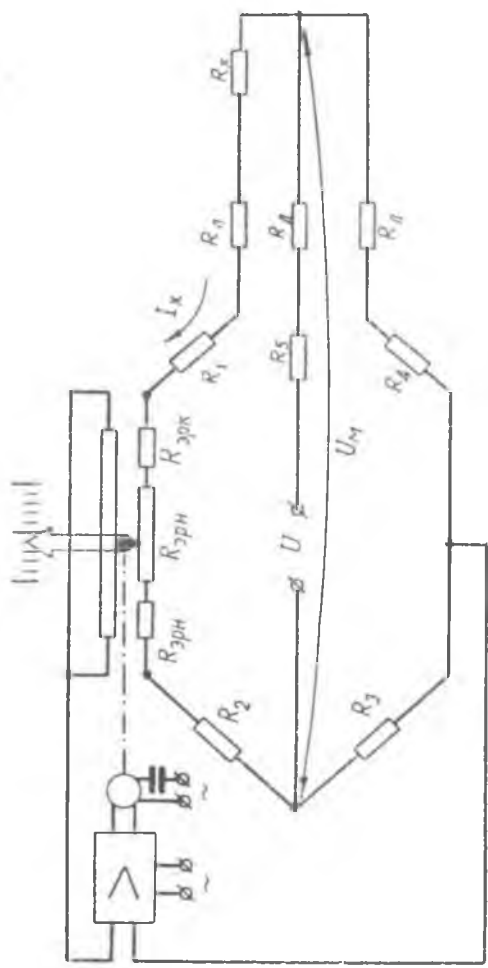


Рис. 1. Принципиальная измерительная схема мостов ЭМП ($R_1 \neq 0$) и ЭМД ($R_1 = 0$).

- $R_{\text{эп}}$ — сопротивление эквивалентного реохорда;
 $R_{\text{сп}}$ — сопротивление стандартного реохорда;
 $R_{\text{ш2}}$ — сопротивление, шунтирующее стандартный реохорд;
 λ — относительное приращение сопротивления преобразователя и относительное перемещение движка реохорда

$$\lambda = \frac{\Delta R_x}{\Delta R_m} = \frac{\Delta R_{\text{эп}}}{R_{\text{эп}}};$$

- λ_c — величина λ , при которой схема рис. 1 симметрична относительно диагонали питания (обычно принимают $\lambda_c = 0,5$);
 k — коэффициент (только для схемы рис. 2)

$$k = \frac{R_3}{R} = \frac{R_4}{R}.$$

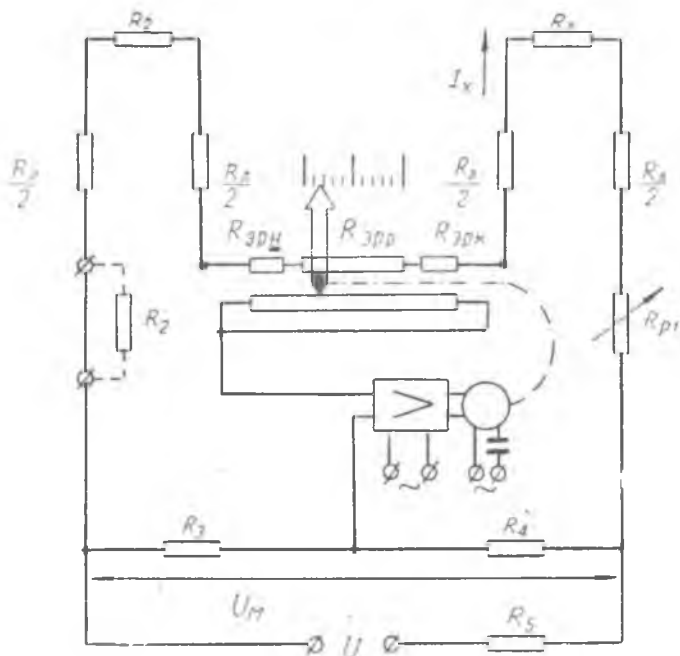


Рис. 2. Принципиальная измерительная схема симметричного моста.

Результаты сравнения измерительных схем фиг. 1 и фиг. 2 показывают следующее.

1. Расчетные формулы для схемы рис. 2 значительно проще, чем для схемы рис. 1 ($R_1=0$).
2. Шкала моста фиг. 2, градуированная в единицах сопротивления, равномерна как и у мостов типа рис. 1.
3. В силу симметрии схемы рис. 2 относительно измерительной диагонали градуировка прибора будет справедливой для различ-

| Схемы Величины | Рис. 1 ($R_1 = 0$) | Рис. 1 ($R_1 \neq 0$) | Рис. 2. |
|-------------------|---|--|--|
| $I_{t_{\min}}$ | | | $\frac{P_{\Delta \max}}{R_1 \max}$ |
| $I_{t_{\max}}$ | | | $\frac{U_{M \max}}{R \cdot \Delta R_m}$ |
| R | | | $(1, 0) \cdot (1, 2) I_{t_{\max}}$ |
| R_c | $\frac{(R \cdot t_c \Delta R_m) R (R_{y \min} R_1) }{R \cdot \Delta R_m (1 - \gamma)}$ | $0,5 (R \cdot t_c \Delta R_m)$ | kR |
| R_1 | $R \cdot t_c \Delta R_m (R_1 + R_1)$ | $R_1 R_1$ | R_1 |
| $R_{\text{зпр}}$ | $\frac{R}{R + t_c \Delta R_m} \Delta R_m$ | $0,5 \Delta R_m$ | $0,5 \Delta R_m$ |
| $R_{\text{сп}}$ | | $R_{\text{зпр}} (1 - \beta + \gamma)$ | |
| $R_{\text{ш}}$ | | $\frac{R_{\text{сп}} \cdot R_{\text{зпр}}}{R_{\text{п}} - R_{\text{зпр}}}$ | |
| R_3 | 0 | $R_1 R_{\text{зпр}} t_c \Delta R_m R_{\text{зпр}} (1 - \gamma - t_c)$ | 0 |
| R_2 | $R_3 R_{\text{зпр}} (\beta - t_c)$ | | $R_{1 \min} R_{\text{зпр}} (1 - \gamma - \beta)$ |
| R_4 | $\frac{U_{\text{max}}}{I_{t_{\min}} - I_{t_{\max}}} - R_3$ | | $\frac{U_{\text{max}}}{I_{t_{\min}} - I_{t_{\max}}}$ |

характер

инсала

 $\Delta R_{\text{зпр}}$ ΔR_m

ных значений R . Для мостов же типа рис. 1 градуировка спра-
ведлива только при определенном значении $R_{л}$ (обычно 2,5 ом).
Практически это означает, что:

а) сокращается трудоемкость подгонки линии связи при мон-
таже моста рис. 2.

В случае мостов рис. 1 необходимо трехкратное измерение пе-
реносным мостом (например, типа УМВ) сопротивления различ-
ных пар проводов линии связи, закороченных у объекта измерения,
составление уравнений и решение их для определения сопротивле-
ния каждого провода; расчет, изготовление, измерение, под-
гонка и установка двух добавочных сопротивлений, дополняющих
 $R_{л}$ плеч моста до номинальной величины. Отметим, что непосред-
ственный контроль правильности подгонки невозможен.

При уравнивании сопротивлений линии связи схемы рис. 2 не
требуется ни дополнительный прибор, ни производство каких-либо
расчетов. Необходимо только замкнуть попарно провода линии
связи у объекта измерения и переменным сопротивлением R_{p}^1
установить стрелку прибора на середину шкалы (по омам); на
этом операция уравнивания заканчивается;

б) неточная подгонка сопротивлений линий связи рис. 1 при-
водит к возникновению погрешности

$$\gamma_{\lambda} = \frac{\lambda_c \frac{\Delta R_{л1}}{R} - \lambda \frac{\Delta R_{л2}}{R} + \frac{\Delta R_{л1} - \Delta R_{л2}}{\Delta R_m}}{1 + \frac{\Delta R_{л2}}{R} + \lambda_c \frac{\Delta R_m}{R}} 100\%, \quad (1)$$

где $\Delta R_{л1}$, $\Delta R_{л2}$ — отклонение сопротивления верхнего и нижнего
проводов линии связи, входящих в плечи моста,
от номинальной величины.

Если подгонка выполнена точно, возникает температурная
погрешность вследствие изменения температуры окружающей
линию связи среды

$$\gamma_t = \Delta t \frac{\left[\alpha_1 \lambda_c - \alpha_2 \lambda + (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{R}{\Delta R_m} \right]}{\alpha_2 \Delta t + \frac{R}{R_{л1}} + \lambda_c \frac{\Delta R_m}{R_{л1}}} 100\%, \quad (2)$$

где Δt — приращение температуры линии связи относительно
номинальной;

α_1 , α_2 — эквивалентные температурные коэффициенты сопротив-
ления линии связи

$$\alpha_1 = \alpha \frac{R_{л1м}}{R_{л1}}; \quad \alpha_2 = \alpha \frac{R_{л2м}}{R_{л2}}, \quad (3)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления меди;
 $R_{л1м}$, $R_{л2м}$ — сопротивления „медной части“ проводов линии связи.

Выражение (1) или (2) показывает, что при $\Delta R_{л1} = \Delta R_{л2}$ или
при $\alpha_1 = \alpha_2$ погрешность γ_{λ} или γ_t будет равна нулю для схем
рис. 1 лишь в одной точке шкалы ($\lambda = \lambda_c$), когда мост рис. 1
становится симметричным относительно диагонали питания.

Для схемы рис. 2 погрешность γ_L не возникает, так как равенство сопротивлений линии связи, входящих в смежные плечи моста, контролируется последним при выравнивании.

Температурная погрешность для схемы рис. 2 определяется как

$$\gamma_t = \Delta t \frac{R_L}{\Delta R_m} (\alpha_1 - \alpha_2) 100\%; \quad (4)$$

она не зависит от измеряемой величины и при $\alpha_1 = \alpha_2$ равна нулю не в одной, а в любой точке шкалы;

в) схема рис. 2 позволяет получить существенную экономию меди, затрачиваемой на линии связи. Это возможно благодаря тому, что схема рис. 2 не критична к величине R_L и ее можно увеличивать за счет снижения поперечного сечения провода линии. Расход меди может быть снижен в q раз.

$$q = 0,75 m, \quad (5)$$

где

$$m \approx \frac{R_{II}}{R_{I}}, \quad (6)$$

R_{I} , R_{II} — сопротивления проводов линии связи для схем рис. 1 и 2 соответственно.

Вследствие несовершенства технологии изготовления проводов величина m не может безгранично возрастать. Допустимое значение m определяется по формуле

$$m \approx 1 + \frac{\alpha}{|\alpha_1 - \alpha_2|} \cdot \frac{\Delta R_m}{R}, \quad (7)$$

причем разность $\alpha_1 - \alpha_2$ для медных проводов имеет величину порядка $10^{-5} \text{ град}^{-1}$.

При монтаже моста типа рис. 1, с применением провода линии связи сечением $2,5 \text{ мм}^2$ необходимо затратить при $R_L = 2,5 \text{ ом}$ 25 кг меди. Если применить схему рис. 2, приняв $m = 5$, на монтаж одного моста потребуется всего $6,4 \text{ кг}$ медного провода сечением $0,5 \text{ мм}^2$. В стране ежегодно монтируется десятки тысяч мостов; если их выпускать по схеме рис. 2, может быть получена годовая экономия десятков миллионов килограммов меди;

г) при определенной величине R_L для схем рис. 1 невозможно увеличивать дальность действия системы «мост — измеряемое сопротивление» без резкого увеличения расхода меди.

Схема рис. 2 позволяет значительно увеличивать дальность действия, т. к. величина R_L может изменяться в широких пределах, и провода линии могут иметь малое сечение.

Если применять для схем рис. 1 и 2 провода линии связи равного поперечного сечения, дальность действия схемы рис. 2 возрастет в $0,5 m$ раз; если для схем рис. 1 и 2 принять одинаковые ве-

| Схемы Величины | Рис. 1 ($R_1 = 0$) | Рис. 1 ($R_1 \neq 0$) | Рис. 2. |
|-----------------------------------|---|---|---|
| $S_{R_A}^U$ | $\frac{U(1-\eta)}{R(1+\xi)(1+\lambda\xi)}$ | $\frac{0,5U}{R(1+\lambda\xi)}$ | |
| $S_{R_A}^P$ | $\frac{U^2(1-\eta)}{R^2(1+d)(1+\lambda\xi)^2(\xi+\eta)[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]}$ | $\frac{U^2}{R^2(1+d)(1+\lambda\xi)^2[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]}$ | $\frac{U^2}{2R^2(1+d)(1+\lambda\xi)^2[k+\eta+\xi(1-\lambda)]}$ |
| $R_{\text{ис}}$ | $\frac{R(\xi-\eta)(1-\eta)[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]}{(1-\lambda\xi)}$ | $0,25R[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]$ | $0,5R[k+\eta+\xi(1+\lambda)]$ |
| $\frac{S_{R_1}^U}{P_{\text{ис}}}$ | $\frac{(1-\eta)(1+\lambda_c\xi)}{U(1+\xi)[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]}$ | $\frac{0,5(1+\lambda_c\xi)}{U[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]}$ | $\frac{k}{U(1+2k+\lambda\xi)}$ |
| $\frac{S_{R_1}^P}{R_{\text{ис}}}$ | $\frac{(1-\eta)(1+\lambda_c\xi)}{R^2(1+d)(1+\lambda\xi)(\xi+\eta)[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]}$ | $\frac{1+\lambda_c\xi}{R^2(1+d)(1+\lambda\xi)[2+\xi(\lambda+\lambda_c)]}$ | $\frac{k}{R^2(1+d)(1+\lambda\xi)[k+\eta+\xi(1-\lambda)]} \times \frac{1}{\lambda(1+2k+\lambda\xi)}$ |

$$\eta = \frac{R_{x \min} + R_A}{R}; \quad \xi = \frac{\Delta R_m}{R}$$

личины R , ΔR_m , $R_{x \min}$ — дальность действия схемы рис. 2 при $\beta = \gamma = 0$ может возрасти в n раз

$$n = \frac{R - 2R_{x \min} - \Delta R_m}{2R_{л1}} \quad (8)$$

4. Преимуществом схемы рис. 2 является также и то, что для всех таких схем с различными ΔR_m величины равных сопротивлений R_3 , R_4 могут быть взяты одинаковыми; более того, их можно изготавливать не из термостабильного манганина, а из термочувствительных металлов или сплавов, если они будут находиться в одинаковых температурных условиях.

Величины же сопротивлений схем рис. 1 взаимозависимы и различны для схем с различными ΔR_m , причем ни одно из сопротивлений (кроме R_x) не должно изменять своей расчетной величины.

5. В таблице 2 приведены выражения, определяющие чувствительность схем по напряжению $S_{R_x}^U$, мощности $S_{R_x}^P$, выходное сопротивление $R_{ис}$ измерительной схемы.

Дополнительно введена величина

$$d = \frac{R_{и1}}{R_{ис}}$$

где $R_{и1}$ — сопротивление нагрузки моста.

Для более полной характеристики мостов можно использовать отношение чувствительности по напряжению и мощности к величине мощности $P_{ис}$, потребляемой измерительной схемой $P_{ис}$ опреде-

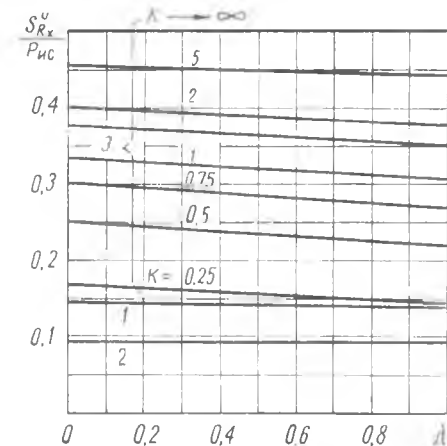


Рис. 3. Функции $S_{R_x}^U : P_{ис} = F(\lambda)$ для мостов типа ЭМД 1, ЭМП 2 и моста рис. 2 при различных значениях k . Для всех мостов: $\Delta R_m = 42,26 \text{ ом}$; $R_{x \min} = 46 \text{ ом}$; $R = 400 \text{ ом}$; $I_{x \max} = 7 \text{ ма}$. Напряжение $U_M = 2,8 \text{ в}$ для 1 и 2; $U_M = 0,975 \text{ в}$ для 3.

ляется при $R_3 = 0$, а также отношение $R_{л1} : R$.

В схеме рис. 2 сумма сопротивлений R_3 и R_4 может изменяться; это позволяет снизить величину $P_{ис}$ при достаточно большой величине k и улучшить тем самым энергетические характеристики моста

$P_{ис}$; $S_{R_x}^U : P_{ис}$ (рис. 3); $S_{R_x}^P : P_{ис}$ по сравнению с мостами рис. 1.

Незначительность температурной погрешности схемы рис. 2 позволяет получить большее, чем для схем рис. 1, отношение $R_{л1} : R$.

В лаборатории кафедры «Автоматизация производственных процессов» Уфимского нефтяного института схема рис. 2 всесторонне испытана. На Уфимском НПЗ имени XXII съезда КПСС в течение 5 месяцев безотказно работал мост, измерительная схема которого соответствовала рис. 2. Результаты промышленных испытаний подтверждают все вышеуказанные положительные свойства схемы рис. 2.

Переделка существующих мостов, имеющих схему рис. 1, на мосты по схеме рис. 2 несложна и может быть осуществлена в условиях заводских лабораторий и цехов КИП и А; шкала мостов сохраняется (при одной и той же градуировке термометра сопровлнения).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Кольцов. Уравновешенный мост. Авторское свидетельство 1521911, Бюллетень изобретений», 3, 1963.
2. А. А. Кольцов, Д. Н. Карбанов. К расчету измерительных схем электронных автоматических уравновешенных мостов. ИВНЗ «Приборостроение», 2, 1964.