

У. И. РАНДМЕР

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АМПЕРМЕТРА

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957



Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
Серия А № 115 1957

У. И. РАНДМЕР

# О ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АМПЕРМЕТРА

Er. 970

ENSU Teaduslik Akadeemia  
Keskraamatukogu

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957

СОВЕТСКИЙ СОЮЗ

У. И. Рандмер  
О ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АМПЕРМЕТРА

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

\*

Редактор Х. Силлама  
Технический редактор А. Тамм  
Корректор Н. Шервинская

Сдано в набор 10 VIII 1957. Подписано к печати 27 VIII 1957. Бумага  $54 \times 84 \frac{1}{16}$ . Печатных листов 0,75. По формату  $60 \times 92$  печатных листов 0,61. Учетно-издательских листов 0,47. Тираж 800. МВ-06047. Заказ № 4970.

Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк 2.

Цена 35 коп.

## О ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АМПЕРМЕТРА

В современных электродинамических амперметрах для измерения токов выше 0,5 а наибольшее распространение получили две схемы внутренних соединений. В одной (рис. 1а) подвижная катушка  $r_0$  подключена через добавочное сопротивление  $r_2$  к шунту  $r_3$ , а через неподвижные катушки  $r_1$  проходит весь измеряемый ток. Во второй схеме (рис. 1б) подвижная катушка  $r_0$  включена параллельно с неподвижными.

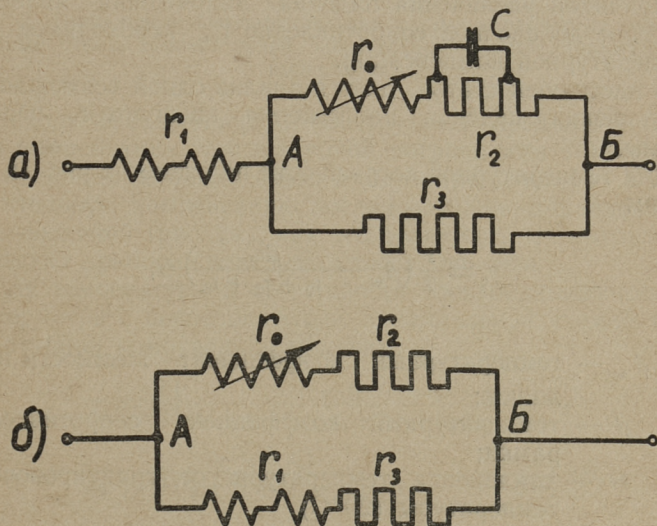


Рис. 1. Применяемые схемы внутренних соединений электродинамического амперметра.

Схемы внутренних соединений амперметров должны, кроме возможности расширения предела измерения, обес-

печить осуществление температурной и частотной компенсации.

В первой схеме температурная компенсация достигается добавочным сопротивлением  $r_2$ ; для компенсации частотной погрешности от индуктивности рамки изготавливают шунт  $r_3$  индуктивным или же зашунтируют часть сопротивления  $r_2$  конденсатором  $C$ . Во второй схеме температурная и частотная компенсации осуществляются согласованием температурных коэффициентов и постоянных времени ветвей подвижной и неподвижных катушек.

Преимуществами первой схемы перед второй являются удобная частотная компенсация и меньшая погрешность от взаимной индуктивности, а недостатками — более сложные переключающие устройства для удвоения предела измерения и некоторое увеличение падения напряжения на шунте, а вместе с тем и потребляемой амперметром мощности (Л1).

Причиной увеличения падения напряжения является большое добавочное сопротивление  $r_2$ , необходимое для температурной компенсации.

В настоящей статье дается анализ одной возможности уменьшения падения напряжения на шунте  $r_3$  первой схемы.

Для температурной погрешности по схеме на рис. 1а получим

$$\gamma_t = \frac{1}{2} \left( \beta_w - \frac{\beta r_0}{r_0 + r_2 + r_3} \right) \Theta, \quad (1)$$

где  $\beta_w$  — температурный коэффициент жёсткости пружинок;

$\beta$  — температурный коэффициент сопротивления рамки;

$\Theta$  — отклонение температуры от градуировочной температуры ( $20^\circ\text{C}$ ).

Формула (1), кроме коэффициента  $1/2$ , полностью совпадает с формулой температурной погрешности последовательно компенсированного магнитоэлектрического милливольтметра, работающего с шунтом  $r_3$  в режиме заданного тока (в качестве амперметра) или с таким же последовательным сопротивлением  $r_3$  в режиме заданного напряжения (рис. 2б).

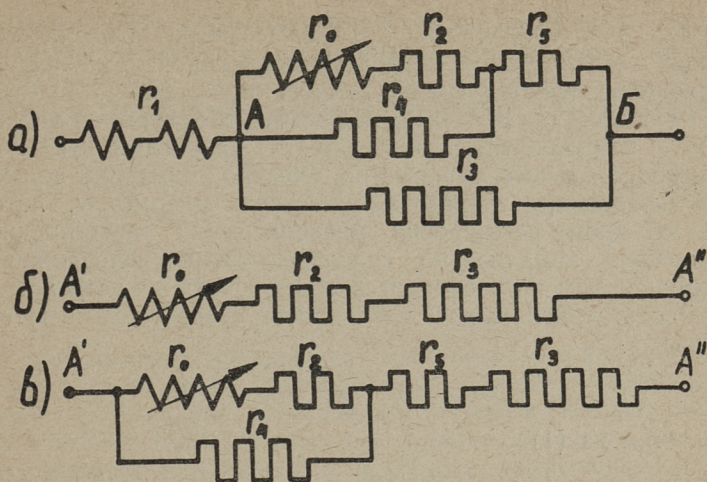


Рис. 2. Последовательно-параллельная схема и расчетные эквивалентные схемы температурной компенсации электродинамического амперметра.

Исходя из сказанного, В. О. Арутюнов предлагает (Л1) для компенсации температурной погрешности заменить в схеме электродинамического амперметра (рис. 1а) последовательную компенсацию последовательно-параллельной компенсацией (рис. 2а), как это делается в магнитоэлектрических приборах высокого класса точности.

Для температурной погрешности электродинамического амперметра с последовательно-параллельной схемой температурной компенсации получим:

$$\gamma_t = \frac{1}{2} \left[ \frac{r_0 r_4 - r_2 (r_3 + r_5)}{(r_0 + r_2) (r_3 + r_4 + r_5) + r_4 (r_3 + r_5)} - \frac{r_2 (r_3 + r_5)}{(r_0 + r_2) (r_3 + r_4 + r_5) + r_4 (r_3 + r_5)} \cdot \frac{\beta \theta}{1 + \beta \theta} \right] \beta \theta, \quad (2)$$

где температурные коэффициенты сопротивления рамки  $r_0$  и параллельного сопротивления  $r_4$  приняты равными  $\beta$ .

Из формулы (2) видно, что температурная погрешность схемы рис. 2а в режиме заданного тока может быть рассчитана как температурная погрешность схемы (рис. 2б), получаемой из исходной размыканием ее в точке А и питанием от полученных зажимов А' — А'' в режиме заданного напряжения.

Так, сопротивление  $r_3 + r_5$  в амперметре с последовательно-параллельной схемой температурной компенсации сохраняет свойства универсального шунта [сопротивления  $r_2 + r_3$  в схеме на рис. 1а] и тем самым обеспечивает одинаковую температурную погрешность на разных пределах многопредельного амперметра. Обычно применяют только двухпредельные электродинамические амперметры, потому что кроме расширения предела рамки нужно также включить параллельно отдельные секции неподвижных катушек, чем и усложняются переключающие устройства.

Вводя для большей наглядности относительные величины

$$\frac{\beta_w}{\beta} = m_w \quad \text{и} \quad \frac{r_0 + r_2 + r_3}{r_0} = n,$$

получим из (1)

$$\gamma_t = \frac{1}{2} \left( m_w - \frac{1}{n} \right) \beta \theta \quad (1')$$

и соответственно из (2)

$$\gamma_t = \frac{1}{2} \left[ m_w - \frac{s - (x - 1)p}{x(s + p) + sp} - \frac{(x - 1)p}{x(s + p) + sp} \cdot \frac{\beta \theta}{1 + \beta \theta} \right] \beta \theta, \quad (2')$$

где

$$x = \frac{r_0 + r_2}{r_0}; \quad p = \frac{r_3 + r_5}{r_0} \quad \text{и} \quad s = \frac{r_4}{r_0}.$$

Анализ формул (2) или (2') показывает, что методику расчета магнитоэлектрических милливольтметров [например, работы В. О. Арутюнова (Л1) и Л. М. Закса (Л2)] с последовательно-параллельной схемой температурной компенсации можно непосредственно расширить и на электродинамические амперметры, выполненные по схеме рис. 2а. Необходимо только учитывать коэффициент  $1/2$ .

Если параметры схемы выбраны согласно условиям температурной компенсации, можем, задаваясь отношением токов  $m = \frac{I}{I_0}$ , определить величину шунта  $r_3$ , т. е. точку подвода общего тока в схеме рис. 1а по формуле:

$$r_3 = \frac{n}{m} r_0 \quad (3)$$

и для схемы рис. 2а.

$$r_3 = \left( x + p + \frac{p}{s} x \right) \frac{r_0}{m}. \quad (4)$$



Таким образом удвоение или расширение предела измерения легко разрешается на основе полученных формул (3) или (4).

Общее сопротивление между точками А и Б для схемы рис. 1а будет:

$$r_{AB} = n \frac{m-1}{m^2} r_0, \quad (5)$$

а для схемы рис. 2а.

$$r_{AB} = \left( x + p + \frac{p}{s} x \right) \left( m-1 - \frac{x}{s} \right) \frac{r_0}{m^2}. \quad (6)$$

При сравнении приведенных схем нельзя не упомянуть, что в первой схеме благодаря отсутствию нелинейной части температурной погрешности компенсация будет полной при всех температурах, а во второй схеме появляется определенная остаточная погрешность, исключение которой возможно только для одной (двух) температур.

Выражение для остаточной температурной погрешности получается из (2):

$$\gamma_{\text{ост}} = - \frac{1}{2} \frac{(x-1)p}{x(s+p) + sp} \cdot \frac{\beta^2 \theta^2}{1 + \beta \theta}. \quad (7)$$

Частотная компенсация электродинамического амперметра, имеющего последовательно-параллельную схему температурной компенсации, может быть осуществлена при изготовлении сопротивлений  $r_3$  и  $r_4$  индуктивными; также может быть применена схема частотной компенсации рис. 3, рекомендованная В. Н. Мильштейном (ЛЗ). Эту схему для рассчитанного в конце статьи амперметра типа ЭЛА 5/10а придется несколько изменить (пунктиром отмеченное включение емкости С на рис. 3).

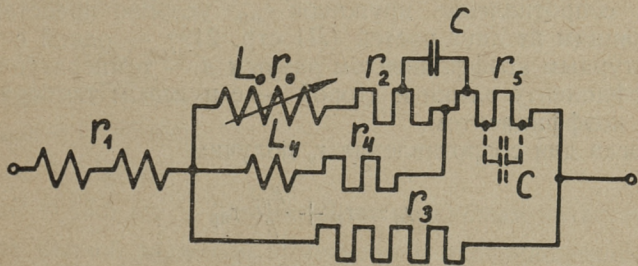


Рис. 3. Полная схема электродинамического амперметра с последовательно-параллельной схемой температурной компенсации.

Приведенный расчет амперметра ЭЛА 5/10а показывает, что, применяя последовательно-параллельную схему температурной компенсации вместо обычной последовательной, можно уменьшить потребляемую амперметром мощность примерно в два раза. В результате могут быть уменьшены габариты, вес и стоимость прибора, а также улучшатся его эксплуатационные показатели.

## ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АМПЕРМЕТРА

Для электродинамического амперметра типа ЭЛА 5/10а приняты следующие исходные данные:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Сопротивление одной неподвижной катушки                 | $1/2 r_1 = 0,023 \text{ ом};$                   |
| 2. Сопротивление подвижной катушки (рамки)                 | $r_p = 0,32 \text{ ом};$                        |
| 3. Сопротивление двух пружинок                             | $r_{пп} = 1,02 \text{ ом};$                     |
| 4. Добавочное последовательное сопротивление на пределе 5а | $r_d = 4,35 \text{ ом};$                        |
| 5. Сопротивление шунта на пределе 5а                       | $r_s = 0,3648 \text{ ом};$                      |
| 6. Температурный коэффициент сопротивления рамки           | $\beta = 0,0041/^\circ\text{C};$                |
| 7. Температурный коэффициент сопротивления пружинок        | $\beta_{пп} = 0,001 \text{ } 1/^\circ\text{C};$ |
| 8. Температурный коэффициент жёсткости пружинок            | $\beta_w = 0,0000 \text{ } 1/^\circ\text{C};$   |

Приведенную на рис. 1а схему для расчета получим, если сопротивление пружинок  $r_{пп}$  условно представить состоящим из двух частей (Л1 стр. 219) — одной с температурным коэффициентом равным  $\beta$  — температурному коэффициенту рамки и второй — с нулевым температурным коэффициентом.

Тогда для сопротивления  $r_0$  получим

$$r_0 = r_p + \frac{\beta_{пп}}{\beta} r_{пп} \quad (7)$$

и

$$r_2 = r_d + \left(1 - \frac{\beta_{пп}}{\beta}\right) r_{пп}. \quad (8)$$

Для схемы рис. 1а получим следующие расчетные данные:

$$r_0 = 0,32 + \frac{0,001}{0,004} 1,02 = 0,575 \text{ ом по формуле (7);}$$

$$r_2 = 4,35 + \left(1 - \frac{0,001}{0,004}\right) 1,02 = 5,115 \text{ ом по формуле (8);}$$

$$m_w = \frac{0,0002}{0,004} = 0,05;$$

$$n = \frac{0,575 + 5,115 + 0,3648}{0,575} = 10,53;$$

$$m = \frac{10,53 \cdot 0,575}{0,3648} = 16,60.$$

Температурная погрешность прибора

$$\gamma_t = \frac{1}{2} \left(0,05 - \frac{1}{10,54}\right) 0,004 \theta \approx -0,00009 \theta \text{ т. е. } 0,09\%$$

на  $10^\circ$  изменения температуры;

$$r_{AB} = 0,575 \cdot 10,53 \frac{16,60 - 1}{16,60^2} = 0,343 \text{ ом.}$$

Полное сопротивление прибора

$$r_{\text{приб}} = 0,389 \text{ ом,}$$

падение напряжения

$$\Delta U = 1,95 \text{ в}$$

и потребляемая амперметром мощность

$$\Delta P = 9,7 \text{ вт (против 10 вт по данным каталогов).}$$

На пределе 10а

$$r_8 = 0,182 \text{ ом;}$$

$$r_{AB} = 0,177 \text{ ом;}$$

$$r_{\text{приб}} = 0,188 \text{ ом;}$$

$$\Delta U = 1,88 \text{ в;}$$

$$\Delta P = 18,8 \text{ вт (против 20 вт по данным каталогов).}$$

Для полной взаимной компенсации линейных температурных погрешностей механизма и схемы мы должны были бы в соответствии с методикой расчета последова-

тельно-параллельной схемы предложенной В. О. Арутюновым (Л1 и Л4) при принятом значении  $\beta_w$ , брать следующие значения параметров схемы

$$x = 2,17; p = 2,17 \text{ и } s = 3,52.$$

Нужное значение сопротивления  $r_2$  получается  $r_2 = 0,673$  ом, что меньше сопротивления манганиновой части пружинок. Поэтому при заданных значениях сопротивлений пружинок и рамки последовательно-параллельная схема с полной взаимной компенсацией линейных температурных погрешностей механизма и схемы не может быть осуществлена. Необходимо изменить сопротивление рамки или довольствоваться некоторой остаточной линейной температурной погрешностью.

Для внедрения данного предложения без изменения конструктивных данных прибора (пружинки, катушки) и для более удобного сравнения получаемого результата с показателями выпускаемого прибора в данном случае выбран второй путь.

По исходным данным получим для данного прибора (см. Л4)

$$x = 2,33; p = 2,33 \text{ и } s = 3,77.$$

Сопротивления:

$$r_4 = 2,17 \text{ ом}; r_3 + r_5 = 1,34 \text{ ом}.$$

Линейная температурная погрешность схемы  $\gamma_{t \text{ с.л.}} = -0,06\%$  на  $10^\circ$  изменения температуры и линейная температурная погрешность прибора с учетом температурной погрешности механизма  $\gamma_{t \text{ л.}} = \gamma_{t \text{ с.л.}} = \gamma_{t \text{ в.}} = 0,04\%$  на  $10^\circ$  изменения температуры.

Кривые температурных погрешностей приведены на рис. 4.

На пределе 5а:

$$r_3 = \frac{0,575}{16,60} \left( 2,33 + 2,33 + \frac{2,33}{3,77} 2,33 \right) = 0,211 \text{ ом};$$

$$r_5 = 1,34 - 0,211 = 1,129 \text{ ом};$$

$$r_{\text{АВ}} = \frac{0,575}{16,6^2} \left( 2,33 + 2,33 + \frac{2,33^2}{3,77} \right) \left( 16,6 - 1 - \frac{2,33}{3,77} \right) = 0,189 \text{ ом};$$

дном морейден Комет  $\Gamma_{\text{приб}} = 0,235 \text{ Ом};$   
 $\Delta U = 1,175 \text{ В};$   
 $\Delta P = 5,87 \text{ Вт}$   
 и на пределе 10а:

$\Gamma_3 = 0,111 \text{ Ом};$   
 $\Gamma_5 = 1,229 \text{ Ом};$   
 $\Gamma_{\text{АВ}} = 0,1 \text{ Ом};$   
 $\Gamma_{\text{приб}} = 0,112 \text{ Ом};$   
 $\Delta U = 1,115 \text{ В};$   
 $\Delta P = 11,15 \text{ Вт}.$

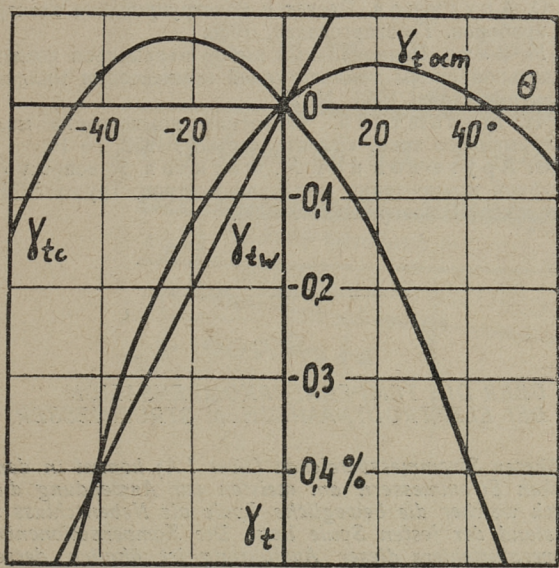


Рис. 4. Кривые температурных погрешностей.

- $\gamma_{tc}$  — температурная погрешность схемы
- $\gamma_{tw}$  — температурная погрешность механизма (жесткости пружинок)
- $\gamma_{t \text{ ост}}$  — остаточная температурная погрешность прибора.

Таким образом, заменяя обычную последовательную компенсацию последовательно-параллельной, можно понизить потребляемую амперметром мощность примерно

на 40 %. Такой выигрыш в потребляемой прибором мощности достигается за счет некоторого усложнения схемы — прибавляется одно сопротивление  $r_4$  — и некоторого увеличения влияния отклонения сопротивления пружинок от номинального на точность прибора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. О. А р у т ю н о в. Расчет и конструирование электронизмерительных приборов. Госэнергоиздат, 1956.
2. Л. М. З а к с. Рациональный выбор параметров последовательно-параллельной схемы температурной компенсации милливольтметров. «Электричество», 1953, № 2.
3. В. Н. Мильштейн. Частотная компенсация милливольтметров переменного тока. «Электричество», 1952, № 10.
4. В. О. А р у т ю н о в и М. М. Ф е т и с о в. К вопросу о расчете температурной компенсации милливольтметров. Труды ЛПИ № 184, Электротехника. Госэнергоиздат, 1956.

ENBY Terveystiete Akademi  
Keskeämatukogu

## ÜBER DIE TEMPERATURKOMPENSATION BEI ELEKTRODYNAMISCHEM STROMMESSER

*Bei höheren Strommessbereichen (über 1 A) kommt in den elektrodynamischen Strommessern am meisten zur Anwendung die Anordnung, nach welcher die bewegliche Spule als Nebenschluss zu einem Vorwiderstand der festen Spule liegt. Die Kompensationenbedingung des Temperaturfehlers dieser Ausführung ist ähnlich derselben bei einem Drehspulmillivoltmeter: man muss nur den quadratischen Skalenverlauf berücksichtigen. Um die Temperaturabhängigkeit der Anzeige zu beseitigen, schaltet man in Reihe mit der beweglichen Spule einen temperaturunabhängigen Vorwiderstand. Dabei wird auch der Eigenverbrauch des Strommessers vergrößert.*

*Man zeigt es in dieser Veröffentlichung, dass es möglich ist den Eigenverbrauch dieser Ausführung des elektrodynamischen Strommessers zu verringern, wenn man statt des obenerwähnten temperaturunabhängigen Widerstandes eine Kunstschaltung aus einem temperaturabhängigen Parallel- und einem temperaturunabhängigen Vorwiderstände anwendet. Diese Kompensationschaltung ist bekannt bei Drehspulmillivoltmetern als sogenannte Swinburne-Schaltung.*



Цена 35 коп.