

21 (37)

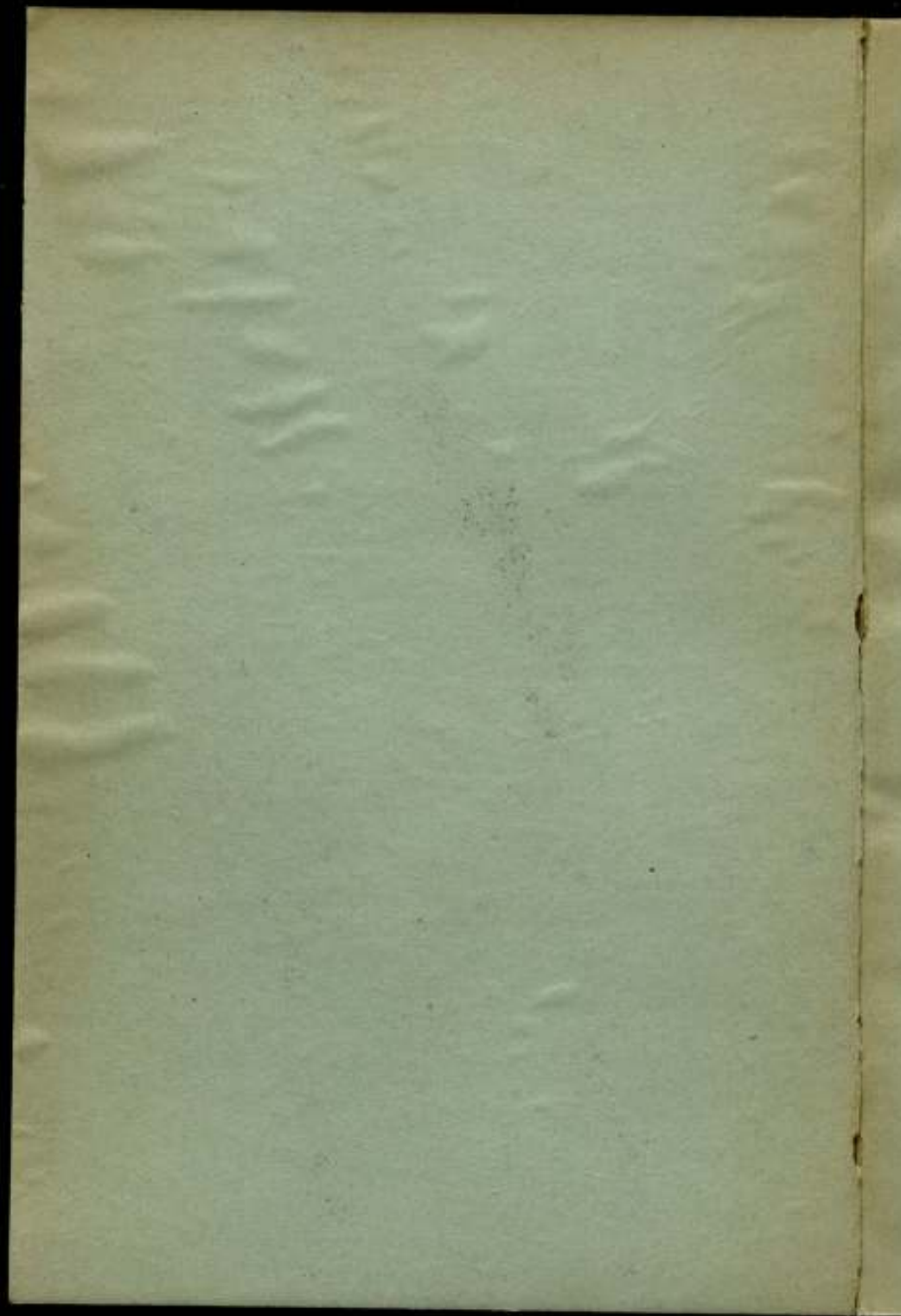


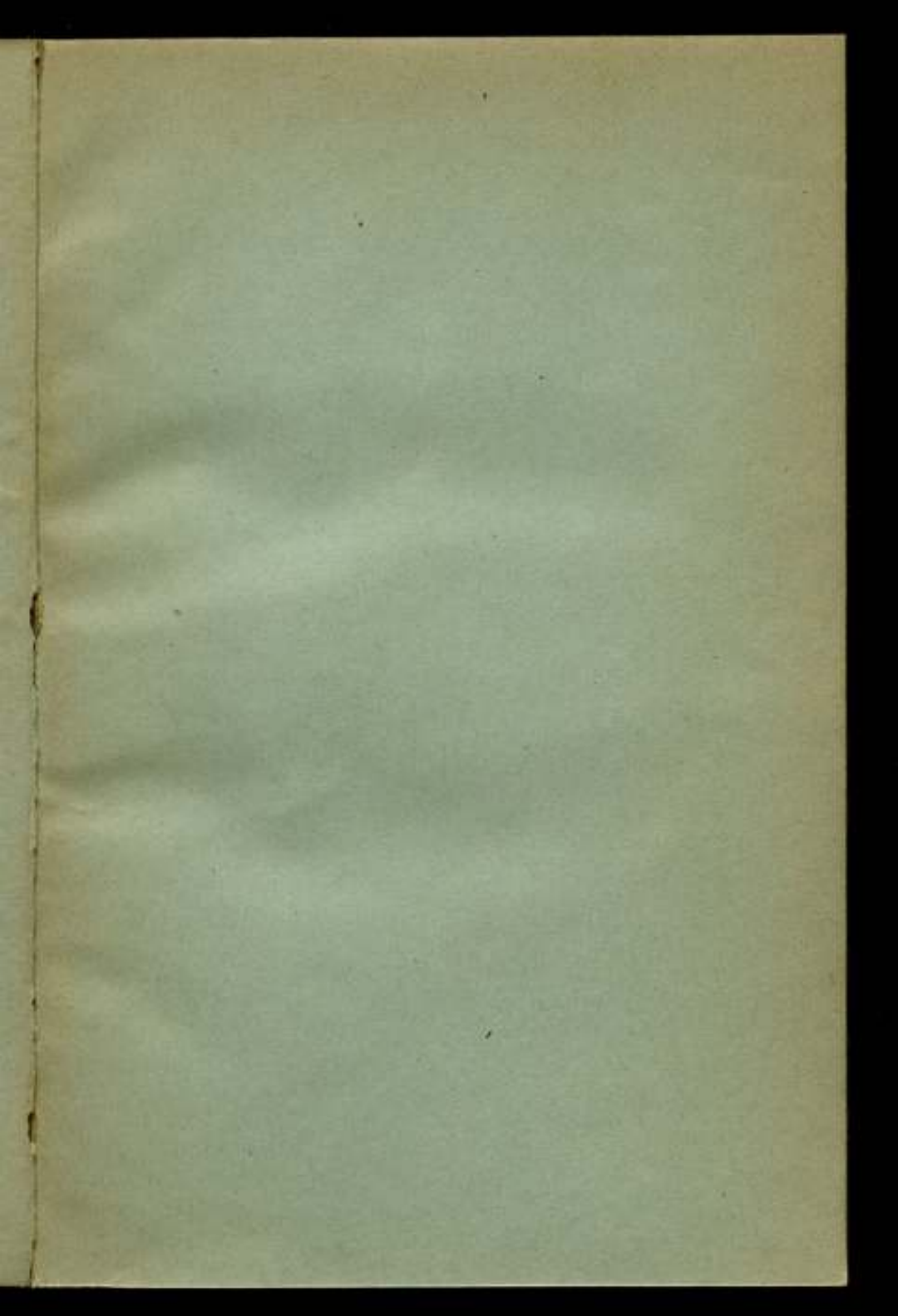
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

Выпуск

20 (36)
21 (37)

1939





ТРУДЫ ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ



Выпуск 20(36)

21(37)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

Под редакцией проф. Н. А. Маренина

№ 57 93

ГОНТИ
РЕДАКЦИЯ ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД 1939 МОСКВА

RECHERCHES ET MESURES ELECTRIQUES

Redacteur prof. *N. A. Marenin*

Сборник посвящен работам Лаборатории электрических токов и напряжений и Лаборатории электрических мер Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии. Вопросы, рассматриваемые в статьях сборника, представляют интерес для лиц, работающих в области электрических измерений как в лабораториях научно-исследовательских институтов, так и в заводских лабораториях.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Настоящий сборник охватывает работы электрических лабораторий ВНИИМа за период 1932—1936 гг.

Все возрастающая потребность в точных измерениях вообще и в электрических измерениях в частности делает необходимой широкую научную информацию по вопросам электрических измерений, повышения их точности, анализа погрешностей, вносимых как самими приборами, так и методикой измерения. Наконец, важную роль играют вопросы расширения пределов измерений и внедрения метрологических методов в те области электротехники, которые правильной и точной методикой измерений не имеют.

Все это охватывает чрезвычайно широкий круг вопросов электрометрии и рассмотреть хотя бы небольшую их часть невозможно в рамках одного сборника.

В настоящем сборнике авторы все же ставят своей целью познакомить интересующихся с некоторыми работами, относящимися как к анализу существующих методов измерений, так и к расширению пределов измерений.

Этот сборник является одним из целой серии предполагаемых к выпуску сборников, посвященных работам электрических лабораторий Всесоюзного научно-исследовательского института.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА К ИЗМЕРЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФИЦИЕНТОВ

Под дифференциальным гальванометром, в общем случае, будем понимать прибор, имеющий две противоположно намотанные обмотки, обтекаемые сравнимыми токами и взаимодействующие с полем постоянных магнитов. Поля, создаваемые обмотками катушки, направлены противоположно и при соответствующем расположении частей прибора и равенстве ампервитков катушек можно добиться отсутствия смещения подвижной части прибора при включенном токе. Различаются следующие типы дифференциальных гальванометров:

- 1) электромагнитные — с неподвижными катушками;
- 2) магнитно-электрические с подвижными катушками.

Гальванометры первого типа имеют подвижную систему постоянных магнитов и неподвижные обмотки, обтекаемые током, причем обе неподвижные обмотки должны находиться на общей катушке, так как иначе наблюдаются изменения показаний прибора, что значительно затрудняет работу. Так как зазоры между катушкой и магнитной системой довольно значительны, а кроме этого величина магнитного потока постоянных магнитов невелика, на гальванометры указанного типа заметно влияют посторонние поля и статические заряды. В качестве защитного средства приходится применять соответствующее экранирование. Одним из следствий этой причины является непостоянство нулевого положения.

Гальванометры второй группы имеют постоянные магниты, в поле которых находится дифференциально намотанная рамка. Воздушный зазор здесь чрезвычайно мал, порядка долей 1 мм, в то время как значение индукции в зазоре достаточно велико, порядка тысячи гаусс. Следствием отсюда является уменьшение влияния внешних полей, что позволяет отказаться от экранирования. Гальванометры этой системы выгодно отличаются устойчивостью нуля. При практическом оформлении приборов данного вида вызывает затруднение выполнение четырех токопроводящих лент к подвижной катушке.

Одним из способов применения дифференциального гальванометра к измерению сопротивлений является предложенный Кольраушем¹ метод сравнения одинаковых сопротивлений. Этот метод поставлен в Лаборатории электрических образцовых мер ВНИИМа под руковод-

¹ F. Kohlrausch: Gesammelte Abhandlungen I, S. 582. W. Jaeger. Z. S. Instrik. 1904, 288.

ством А. И. Марениной, причем его удастся использовать и для определения температурных коэффициентов сопротивлений.

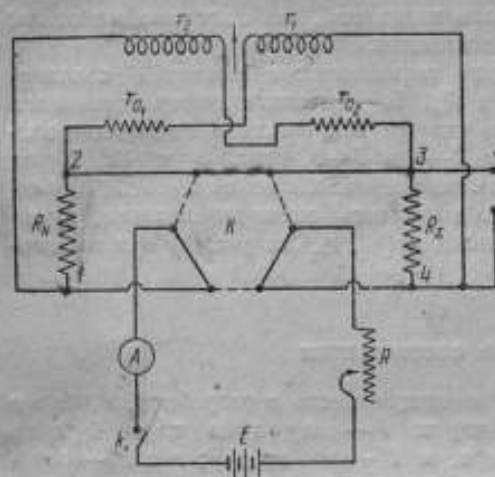


Рис. 1.



Рис. 2.

Подобные манипуляции с пауком, как видно из рис. 3 и 4, дают возможность изменять направление тока в цепи самих сопротивлений, оставляя его неизменным в обеих обмотках гальванометра, что имеет

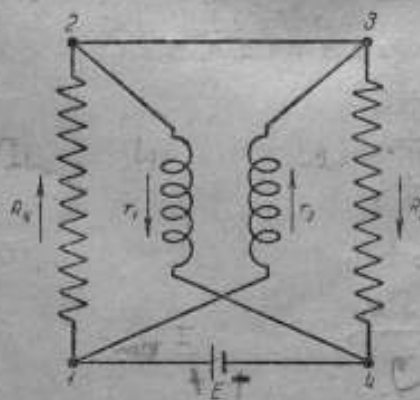


Рис. 3.

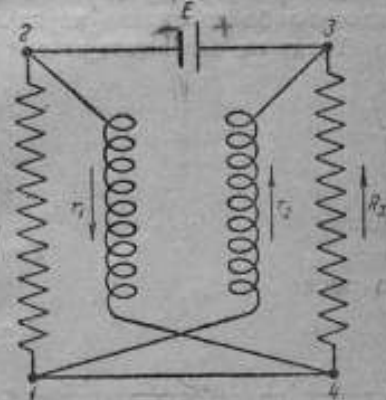


Рис. 4.

Эталон R_N и сравниваемое сопротивление R_x включаются последовательно, как указано на рис. 1, где E — батарея аккумуляторов (э. д. с. от 4 до 12 В), R — регулирующее сопротивление, A — амперметр, K — шестиполюсный переключатель-паук,¹ r_1 и r_2 — сопротивления обмоток дифференциального гальванометра, r_{01} , r_{02} — добавочные сопротивления в цепи обмоток гальванометра, R_W — сопротивление шунта.

Ток от батареи E подводится к переключателю-пауку с ртутными контактами (рис. 2), дающими до и после своей перекидки комбинацию включений, указанных сплошными и пунктирными линиями на рис. 1 и схематически отдельно, для каждого положения, на рис. 3 и 4.

¹ Предложен Steinvohl'ом.

целью устранение влияния термоэлектродвижущей силы. Образование термоэлектродвижущей силы можно объяснить различием температуры подводящих проводников и самого манганина, из которого намотаны сравниваемое и эталонное сопротивления.

Как видно из рис. 1, обмотки гальванометра замкнуты соответственно одна на R_N , а другая на R_x . В результате дифференциального действия обмоток гальванометра удается исключить влияние сопротивления соединительных проводов 2—3 и 1—4 (рис. 3 и 4). Перед началом работы следует уравнять сопротивления цепей обмоток гальванометра, что, конечно, возможно выполнить экспериментально, путем включения добавочного сопротивления (r_0, r_0' на рис. 1) в зависимости от состояния обмоток.

Основные соотношения

Аналитические соотношения, имеющие место в разработанной выше схеме, следующие. Обозначим через: I — силу тока главной цепи в первом положении коммутатора и I' — во втором; r и r' — соответственно сопротивления соединительных проводов (считая, что параметры цепи за время перекидки паука переменны).

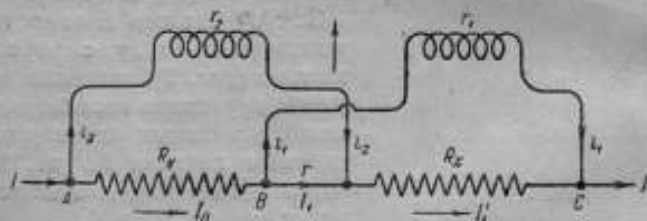


Рис. 5.

Изобразим нашу схему в виде, данном на рис. 5 (для одного какого-либо положения паука).

Тогда на основании закона Кирхгофа для точек A, B и C :

$$I = i_2 + I_0$$

$$I_0 = I_1 + i_1$$

$$I = I_1 + i_1$$

или

$$I = i_1 + i_2 + I_1, \quad (1)$$

а также

$$i_2 = \frac{R_N I_0 + r I_1}{r_2}$$

откуда, подставляя значение $I_0 = I - i_2$:

$$i_2 = \frac{R_N I + r I_1}{r_2 + R_N}; \quad (1a)$$

$$\bar{i}_1 = \frac{R_x i_1 + r_1 i_1}{r_1}, \text{ или после подстановки } I_1' = I - i_1:$$

$$i_1 = \frac{R_x I + r_1 I}{R_x + r_1} \quad (16)$$

Решая теперь уравнение (1) относительно I_1 , получим:

$$I_1 = \frac{I[(r_2 + R_N)(r_1 + R_x) - R_N(r_1 + R_x) - R_x(r_2 + R_N)]}{(r_2 + R_N)(r_1 + R_x) + r(R_N + R_x + r_1 + r_2)},$$

откуда после простых преобразований имеем:

$$i_1 = \frac{I[R_x(R_N + r_2) + r(R_x + r_2)]}{(r_2 + R_N)(r_1 + R_x) + r(R_N + R_x + r_1 + r_2)}$$

$$i_2 = \frac{I[R_N(R_x + r_1) + r(R_N + r_1)]}{(r_2 + R_N)(r_1 + R_x) + r(R_N + R_x + r_1 + r_2)}$$

Положим для упрощения

$$M = \frac{I}{(R_N + r_2)(R_x + r_1) + r(R_N + R_x + r_1 + r_2)}$$

для первого положения паука, и соответственно для второго положения:

$$M' = \frac{I'}{(R_N + r_2)(R_x + r_1) + r'(R_N + R_x + r_1 + r_2)}$$

Подставляя эти обозначения в выражения для i_1 и i_2 , получим: для первого положения коммутатора:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= M[R_x(R_N + r_2) + r(R_x + r_2)] \\ i_2 &= M[R_N(R_x + r_1) + r(R_N + r_1)]; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

для второго положения:

$$\left. \begin{aligned} i_1' &= M'[R_N(R_x + r_2) + r'(R_N + r_2)] \\ i_2' &= M'[R_x(R_N + r_1) + r'(R_x + r_1)]. \end{aligned} \right\}$$

Обозначим токовую чувствительность отдельных обмоток гальванометра через:

$$S_{i_1} = \frac{A \text{ делений шкалы}}{\text{ампер}} \text{ — для 1-й обмотки с сопротивлением } r_1,$$

$$S_{i_2} = \frac{B \text{ делений шкалы}}{\text{ампер}} \text{ — для 2-й обмотки „ „ „ } r_2.$$

Тогда, учитывая дифференциальность действия обмоток, получим для отклонений φ_1 и φ_2 гальванометров соответственно двум положе-

ниями переключателя выражения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= M [S_{i_1} [R_x(R_N+r_2)+r(R_x+r_2)] - S_{i_2} [R_N(R_x+r_1)+r(R_N+r_1)]] \\ \varphi_2 &= M' [S_{i_1} [R_N(R_x+r_2)+r'(R_N+r_2)] - S_{i_2} [R_x(R_N+r_2)+r'(R_x+r_1)]] \end{aligned} \right\} (3)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= M [S_{i_1} [R_x(R_N+r_2)+r(R_x+r_2)] - S_{i_2} [R_N(R_x+r_1)+r(R_N+r_1)]] \\ -\varphi_2 &= M' [S_{i_2} [R_x(R_N+r_1)+r'(R_x+r_1)] - S_{i_1} [R_N(R_x+r_2)+r'(R_N+r_2)]] \end{aligned} \right\}$$

Уравнения (3) соответствуют, в общем виде, двум отсчетам по шкале установки, в разные стороны, относительно какого-либо начального положения. Будем считать, что за время перекидки переключателя паука э. д. с. батареи и сопротивления соединительных проводников постоянны, т. е. $I=I'$, $r=r'$, $M=M'$; складывая показания гальванометра, получим:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = M [S_{i_1} (R_x - R_N) (r_2 + r) + S_{i_2} (R_x - R_N) (r_1 + r)], \quad (3a)$$

откуда очевидно, что отсутствие отклонения гальванометра при переключении паука возможно только в том случае, когда $R_x = R_N$.

При этом равенство (3a) будет удовлетворяться независимо от величины сопротивления обмоток гальванометра по отношению к измеряемому.

Выявим условия, обеспечивающие одинаковую чувствительность к току обеих обмоток, т. е.

$$S_{i_1} = S_{i_2},$$

для чего положим, что $R_N = R_x$ и $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

Тогда с помощью одного из уравнений (3) получим:

$$\frac{S_{i_1}}{S_{i_2}} = \frac{R_N + r_1}{R_N + r_2},$$

откуда видно, что токовые чувствительности S_{i_1} и S_{i_2} только в том случае одинаковы, если $r_1 = r_2$, т. е. сопротивления обеих обмоток дифференциального гальванометра одинаковы. Последнее в лабораторных условиях выполнялось регулированием специальными сопротивлениями (см. на схеме r_{01} и r_{02}), последовательно включенными в цепь обмоток. Регулировка производится до тех пор, пока при $R_x = R_N$ отклонения в обе стороны не будут равны нулю.

Положим теперь, что выполнено условие $S_{i_1} = S_{i_2} = S_i$, т. е. $r_1 = r_2$, тогда уравнение (3a) дает:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = MS_i \cdot 2(r_1 + r)(R_x - R_N),$$

откуда

$$\begin{aligned} R_x &= R_N + \frac{1}{2MS_i(r_1+r)}(\varphi_1 - \varphi_2) = \\ &= R_N + \frac{(R_N+r_1)(R_x+r_1)+r(R_N+R_x+2r_1) \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{2IS_i(r_1+r)} \\ R_x &= R_N + C_0(\varphi_1 - \varphi_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$C_0 = \frac{(R_N + r_1)(R_x + r_1) + r(R_N + R_x + 2r_1)}{2IS_1(r_1 + r)} \quad (5)$$

В данном случае C_0 имеет смысл постоянной прибора (цена деления); величина последней, как будет показано ниже, определяется экспериментально, исходя из соображений:

$$C_0 = \frac{R_x - R_N}{\varphi} = \frac{R_x - R_N}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (6)$$

где φ — отсчет по шкале прибора при определении цены деления.

Для увеличения точности измерений необходимо получить возможно меньшую по величине C_0 .

Перейдем к рассмотрению отдельных факторов, влияющих на значение постоянной C_0 .

Согласно обозначениям, полагая $r = 0$, имеем:

$$C_0 = \frac{(R_N + r_1)(R_x + r_1)}{2IS_1r_1}$$

откуда следует, что для получения возможно меньшей величины C_0 надо выбирать возможно большими силу тока в неразветвленной части цепи и чувствительность S_1 к току обмоток гальванометра.

С другой стороны, предполагая $S_1 = \text{const}$ и $I = \text{const}$, можно видеть, что C_0 зависит от соотношения между сопротивлениями: обмоток дифференциального гальванометра r_1 , эталона R_N и исследуемого объекта R_x .

Действительно, для нахождения условий минимума C_0 следует рассмотреть минимум выражения вида:

$$y = \frac{(R_N + r_1)(R_x + r_1)}{r_1}$$

откуда

$$\frac{dy}{dr_1} = \frac{r_1^2 - R_N R_x}{r_1^2} = 0$$

или

$$r_1 = \sqrt{R_N R_x} \quad (7)$$

Подстановка последнего выражения в уравнение второй производной

$$\frac{d^2y}{dr_1^2} = + \frac{2}{\sqrt{R_N R_x}}$$

позволяет убедиться в том, что уравнение (7) действительно является условием минимума для C_0 .

Практически выполнение условия $I = \text{const}$ не соответствует возможностям.

Например, известно,¹ что образцовые катушки сопротивления могут быть включены в цепь тока под нагрузкой не свыше 1 W. Отсюда,

¹ ОСТ 7271.

обозначая наибольший допустимый ток через обмотку гальванометра — I , получим для I_{\max} (в амперах):

$$I_{\max} = \frac{1}{\sqrt{R_N}} + i = \frac{1}{\sqrt{R_N}} + 2 \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что даже предполагая постоянным ток i , нельзя или в некоторых случаях просто невыгодно поддерживать $I = \text{const}$.

В лабораторной практике величина тока I изменялась в зависимости от R_N в пределах от $4 \cdot 10^{-3}$ до 10 А.

Если же условно пересчитать получаемую практически цену деления C_0 на постоянный по величине ток в $I = 10^{-2}$ А, при сопротивлении обмоток $r_1 = 760 \Omega$, то получим:

Таблица 1

Сопротивление $R_N = R_x$ в омах	Относительная цена деления $C_0/R_N, \%$	Сопротивление $R_N = R_x$ в омах	Относительная цена деления $C_0/R_N, \%$
0,1	1280 $\cdot 10^{-4}$	1000	0,68 $\cdot 10^{-4}$
1	120 $\cdot 10^{-4}$	10000	2,4 $\cdot 10^{-4}$
10	13,2 $\cdot 10^{-4}$		
100	1,68 $\cdot 10^{-4}$		

Во втором столбце таблицы приведены данные так называемой относительной цены деления гальванометра, понимая под этим C_0/R_N , откуда видно, что в соответствии с уравнением (7) минимум этой величины лежит в пределе между 100 и 1000 Ω .

До сих пор мы считали сопротивление обеих обмоток гальванометра одинаковыми ($r_1 = r_2$).

Положим теперь, что, имея одинаковыми сопротивления эталона и испытуемого объекта, т. е. $R_N = R_x$, а также считая выполненными условия: $I = I'$; $r = r'$; $S_i = S'_i = S_i$; $M = M'$, берем $r_1 \neq r_2$. В этом случае получим при переключении паука K два отсчета: φ_1 и φ_2 .

Из уравнения (3):

$$\varphi_1 = MS_i(N+r)(r_2-r_1); \quad \varphi_2 = MS_i(N+r)(r_2-r_1).$$

Отсюда видим, что получаемые отклонения гальванометра направлены в одну и ту же сторону и будут тем больше, чем больше величина расхождения между сопротивлениями обмоток гальванометра ($r_2 - r_1$).

Рассмотрим теперь, как влияет на подсчет R_x изменение во время работы параметров цепи.

Положим, что $S_i = S'_i = S_i$, т. е. $r_1 = r_2$, но после перекидки паука изменилось сопротивление r соединительного проводника, т. е.

$$r' = r(1 + \gamma), \quad M' = M(1 - \eta),$$

где γ и η — малые величины. Тогда на основании указанного выше можно написать для отсчетов гальванометра:

$$\varphi_1 = MS_i(R_x - R_N)(r_1 + r) \\ - \varphi_2 = M'S_i(R_x - R_N)(r_1 + r') = M(1 - \eta)(R_x - R_N)(r_1 + r + r\gamma),$$

откуда, пренебрегая произведением $\gamma\eta$:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = MS_i (R_x - R_N) [(r_1 + r_2)(2 - \gamma) + r\gamma]$$

$$R_x = R_N + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2MS_i (r_1 + r_2) \left[\left(1 - \frac{\gamma}{2}\right) + \frac{r}{r_1 + r_2} \frac{\gamma}{2} \right]} = R_N + \frac{C_0 (\varphi_1 - \varphi_2)}{\left[1 - \frac{1}{2} \left(\gamma - \frac{r}{r_1 + r_2} \gamma\right)\right]}$$

или

$$R_x = R_N + C'_0 (\varphi_1 - \varphi_2).$$

В этом случае постоянная:

$$C'_0 = \frac{C_0}{1 - \frac{1}{2} \left(\gamma - \frac{r}{r_1 + r_2} \gamma\right)} = C_0 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\gamma - \frac{r}{r_1 + r_2} \gamma\right)\right].$$

Ошибка в определении R_x (при условии, что мы будем пользоваться прежним значением постоянной C_0) будет:

$$\Delta R_x = \frac{1}{2} C_0 \left(\gamma - \frac{r}{r_1 + r_2} \gamma\right) (\varphi_1 - \varphi_2),$$

если $r_1 \gg r$

$$\Delta R_x = \frac{1}{2} C_0 \gamma (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что поправка ΔR_x в виду малости C_0 и η незначительна по величине.

Например, пренебрегая изменением тока I , можно получить для η следующее выражение:

$$\eta \approx \frac{\gamma}{(R_N + r_1)(R_x + r_1)} = \frac{\gamma r (R_N + R_x + 2r_1)}{(R_N + r_1)(R_x + r_1) r (R_N + R_x + 2r_1)}$$

Отсюда можем получить численную величину η в пределах $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-9}$.

Тогда поправка ΔR_x в зависимости от данных схемы, имеет значение: $10^{-7} - 10^{-12} \Omega$, т. е. может представить опасность при измерениях малых сопротивлений (0,001 и ниже).

Объединяя все сказанное, можем заключить, что отсутствие отклонения гальванометра при переключении паука в обе стороны дает уверенность в точном равенстве обоих сравниваемых сопротивлений. То же можно заключить при равных отклонениях, направленных в одну и ту же сторону (это указывает лишь на неидентичность обмоток гальванометра).

Монтаж установки

Установка смонтирована в специальном помещении и в основном состоит из трех частей: измерительного устройства и двух одинаковых

термостатных установок с помещенными в каждой из них эталоном R_N и испытуемым объектом R_x (рис. 6 и 7). Электрические элементы схемы соединены обыкновенным монтажным проводником, целиком растянута в воздухе на шелковых нитях. Измерительное устройство состоит из дифференциального магнито-электрического гальванометра фирмы Сименс-Гальске, обладающего чувствительностью

$$S_i = \frac{1}{55} \cdot 10^{10} \frac{\text{делений}}{\text{ампер}}$$

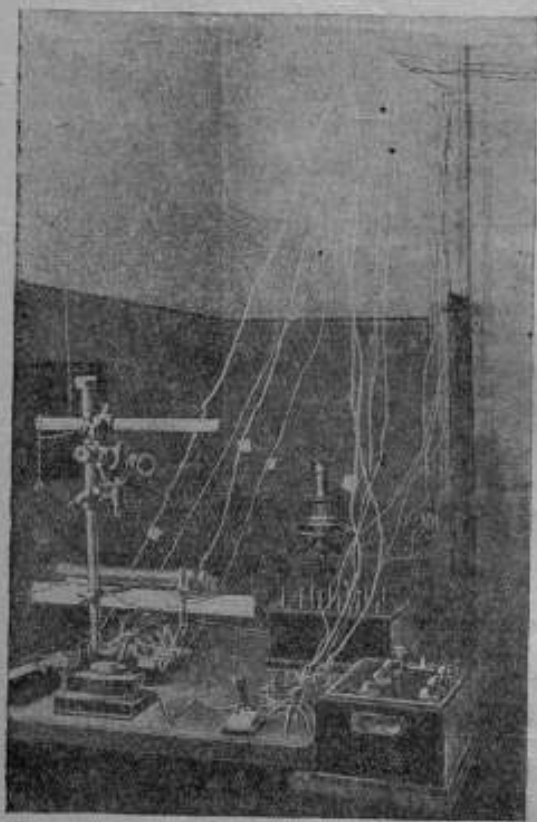


Рис. 6.

и сопротивлением обмоток $r = 60$. Последовательно с каждой из обмоток подключено специально изготовленное и смонтированное сопротивление ($200 + 500 \Omega$), откуда имеется возможность менять сопротивление гальванометра в указанных пределах. Практически удалось установить, что необходимо обратить внимание на величину сопротивления изоляции гальванометрических обмоток. Величина последней дает повод к существенной ошибке, уменьшая электродинамическое действие витков, шунтируя сравнимые сопротивления.

Наличие ошибки возможно определить, имея свободными все выводные концы обмоток. Меняя их местами (наоборот), производим контрольные измерения. Получая такие же результаты, как раньше, можем считать сопротивление изоляции достаточным.

Отсчет по прибору производится с помощью зрительной трубы (субъективный метод) (рис. 6). Расположение приборов таково, что наблюдатель имеет непосредственно под руками: ключ K_1 для включения тока в основной цепи, амперметр A и переключатель-паук K (рис. 1.) Здесь же расположен магазин шунта с соответствующим к нему переключателем.

Термостатные устройства состоят из двух одинаковых металлических баянов, наполненных трансформаторным маслом и имеющих снаружи специальную термозоляцию из слоев асбеста, войлока и клеенки. В центре термостата помещено подогретое устройство, находящееся в трубе с двумя стенками и совмещенное с мешалкой (рис. 7). Подо-

грев осуществляется с помощью змеевика, расположенного внутри трубы между стенок и соединенного свинцовой трубой со вторичной обмоткой подогревного трансформатора. Вторичная обмотка трансформатора — полая трубка, замкнутая при этом накоротко и включенная последовательно, через змеевик с мешалкой в водопроводную сеть. Степень нагрева регулируется секционированием обмоток трансформатора (доска налево, рис. 7) и изменением потока воды. Мешалка помещена в центре трубы на подшипниках и имеет специальной формы лопастиный винт, вращаемый шкивом от асинхронного мотора (направо,

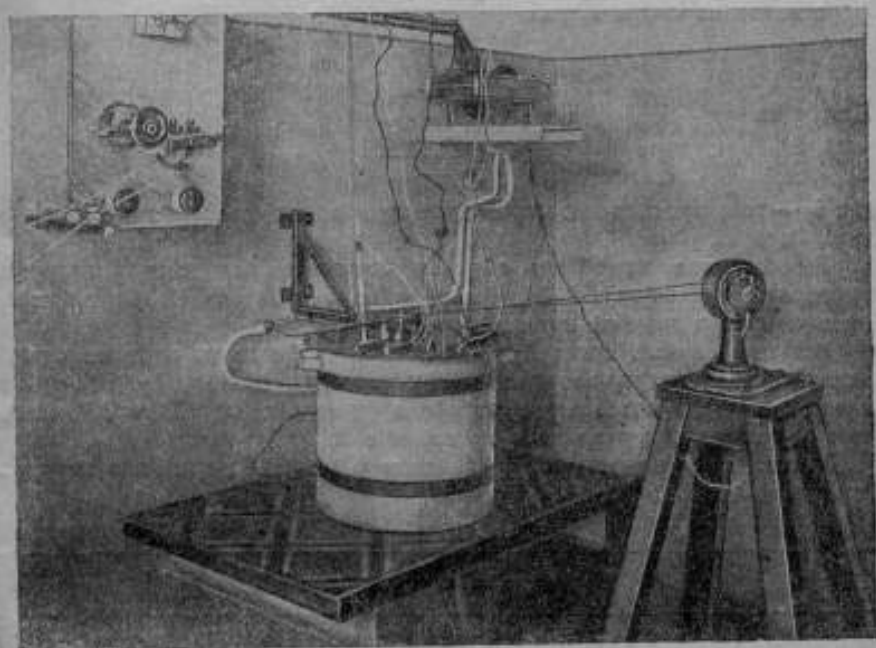


Рис. 7.

рис. 7). Указанное подогревное устройство дает возможность получить в баке температуру в пределах $12-45^{\circ}$. Температура масла внутри бака отмечается не менее чем тремя термометрами, размещенными в различных местах. Благодаря инерционным свойствам термостата, известному опыту и тщательности работы, удается отмечать температуру с точностью до $0,02-0,025^{\circ}$, имея самый обыкновенный термометр с делением до $0,1^{\circ}$.

В дальнейшем установка будет перемещена в специальную термостатную комнату, сооружение которой заканчивается в настоящее время. Термостатная комната имеет тройную изоляцию всех стен, включая окна, пробкой с оческами шерсти и одновременно для выравнивания и поддержания температуры воздуха, внутри самого помещения, около 10 подогревных элементов с терморегуляторами. Помещение установки в термостатной комнате дает возможность поддерживать температуру

всего устройства в целом, значительно повышая тем самым пропускную способность установки и обеспечивая стабильность измерений.

Производство измерений

Обмотки гальванометра замкнуты (как видно на рис. 1) каждая на соответствующее сопротивление и обтекаемы токами, зависящими от разности потенциалов на концах катушек, т. е. от тока нагрузки I .

Пусть ток через обмотки гальванометра будет порядка $2 \cdot 10^{-9}$ А. Тогда нормальную силу тока I_0 в неразветвленной части цепи можно определить из соотношения

Получаем
$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{R_N}{r_2}$$

$$I = I_2 \frac{(r_2 + R_N)}{R_N},$$

где I_2 — ток, проходящий через одну из обмоток гальванометра с сопротивлением r_2 .

Вычисленное подобным образом значение для тока I нагрузки проверяем по формуле (8), после чего устанавливаем этот ток по имеющемуся в главной цепи амперметру.

Возьмем случай, когда $R_N > R_m$, т. е. чтобы иметь нулевые отклонения гальванометра, необходимо шунтировать эталон R_N . Производя измерения через несколько градусов в пределах от 15 до 30°, получим результаты, приведенные в таблице 2.

Температуру эталона поддерживаем равной 20°; при этом значение его равно 1,00006 Ω.

Таблица 2

Температура сопротивления R_m						
		19,4°		23,5°		27,2°
Отклонения гальванометра	Без шунта $R_m = \infty$	С шунтом $R_m = 15650,5$	Без шунта	С шунтом $R_m = 39167,4$	Без шунта	С шунтом $R_m = 17074,9$
	φ_1	+7,5	0	+3,0	0	+6,5
φ_2	-7,5	0	-3,0	0	-6,5	0
$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$	15	0	6,0	0	13	0

В тех случаях, когда нет возможности плавно изменять значение шунта, можно путем интерполяции между значениями двух шунтов R_{m_1} и R_{m_2} , находящихся по обе стороны от истинного, найти последний из следующего выражения:

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{m_1}} + \frac{\varphi_1}{\varphi_1 - \varphi_2} \left(\frac{1}{R_{m_2}} - \frac{1}{R_{m_1}} \right),$$

где φ_1 и φ_2 — отклонения, соответствующие значениям R_m и R_N . Как было указано, для соблюдения условия $\varphi = 0$ необходимо включить шунт к R_N , тогда

$$R_x = R_N - \frac{R_N^2}{R_m + R_N} \approx R_N - \frac{R_N^2}{R_m}$$

Пользуясь последним, найдем в нашем случае:

Температура в °C	19,4	23,5	27,2
Величина R_x в Ω	0,999996	1,000085	1,000115

Того же результата можно достигнуть путем определения цены деления дифференциального гальванометра. Действительно, шунтируя эталон R_N каким-либо сопротивлением R_m , наблюдаем полученное при этом отклонение φ_0 . Затем производим соответственное изменение без шунта и замечаем отклонение φ . Изменение в сопротивлении от включения шунта R_m будет

$$\Delta R_N = \frac{R_N^2}{R_m + R_N}$$

Тогда цена одного деления гальванометра определится как (6):

$$C'_0 = \frac{R_N^2}{(R_m + R_N)(\varphi - \varphi_0)} = \frac{R_N^2}{R_m(\varphi - \varphi_0)} \left(\frac{1}{1 + \frac{R_N}{R_m}} \right)$$

Обычно $R_m \gg R_N$, а поэтому без особого ущерба для точности можно положить:

$$C'_0 = C_0 = \frac{R_N^2}{R_m(\varphi - \varphi_0)} \quad (9)$$

Взяв данные из примера, получим для температуры $19,4^\circ$ $\varphi = 15$ делений и $\varphi_0 = 0$; соответствующее этому изменению в сопротивлении:

$$\frac{R_N^2}{R_m} = \frac{1,00012}{15650,5} = 0,00006390 \Omega$$

а цена деления

$$C_0 = \frac{0,0000639}{15} = 0,00000426$$

Значение самой величины измеряемого сопротивления вычисляется, исходя из тех же соображений, что и выше.

$$R_x = 1,00006 - 0,00000426 \cdot 15 = 0,9999961 \Omega$$

Рассмотрим обратный случай, когда $R_m > R_N$.
Эталон имеет значение $0,999931 \Omega$ при 20°C .

Температура сопротивления R_x						
	16,6°		22°		27,5°	
Отклонения гальванометра	Без шунта	С шунтом $R_m = 21364,5$	Без шунта	С шунтом $R_m = 6542,2$	Без шунта	С шунтом $R_m = 4578,1$
φ_1	+7,5	0	+24,5	0	+35	0
φ_2	-7,5	0	24,5	0	-35	0
$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$	15	0	49	0	70	0

Разница в вычислении будет заключаться лишь в том, что для выполнения условия $\varphi = 0$ необходимо шунтировать не R_N , а R_x , т. е. удовлетворить условию

$$R_N = \frac{R_m R_x}{R_m + R_x} \quad \text{или} \quad R_x = \frac{R_N R_m}{R_m - R_N},$$

откуда

$$R_x = R_N + \frac{R_N^2}{R_m - R_N},$$

или также с практически достаточной точностью

$$R_x = R_N + \frac{R_N^2}{R_m}.$$

В нашем случае:

	Температура		
	16,6°	22°	27,5°
$\frac{R_N^2}{R_m}$	0,0000468	0,00015288	0,000218
R_x	0,9999778	1,0000838	1,0001494

Тот же самый результат получим с помощью определения цены деления дифференциального гальванометра, несколько другим способом, включив шунт к эталону, т. е. увеличив отклонение гальванометра.

Температура $t = 16,6^\circ$

$\varphi_1 = +7,5$	} без шунта	$\varphi'_0 = +39,5$	} с шунтом у эталона $R_m = 5000\Omega$
$\varphi_2 = -7,5$		$\varphi''_0 = -39,5$	
$\varphi_1 - \varphi_2 = +15$		$\varphi'_0 - \varphi''_0 = +79,0$	

Тогда изменение, произведенное включением шунта, будет

$$\Delta R_N = \frac{0,999931^2}{5000} = 0,00019997 \Omega,$$

а соответствующее этому отклонение $\varphi_0 - \varphi = 79 - 15 = 64$, тогда цена деления:

$$C_0 = \frac{0,00019997}{64} = 0,00000312,$$

откуда

$$R_m = 0,999931 + 0,00000312 \cdot 15 = 0,9999778 \Omega.$$

Особенно сильно разогнать подобным включением гальванометр не следует, так как тогда нарастает погрешность от принятого при оптическом отсчете соотношения $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$.

Полученные отклонения (см. выше тот же пример) множим на значение цены деления и получаем уже известные результаты:

Температура в °С	16,6	22	27,5
φ	15	49	70
$\varphi \cdot C_0$	0,0000468	0,00015288	0,000218
$R_x = R_N + \varphi \cdot C_0$	0,9999778	1,0000838	1,0001494

Пользуясь полученными выше данными, можно определить величину температурного коэффициента измеряемого сопротивления, т. е. зависимость $R = f(t)$.

Можно показать, что применение в вычислении цены деления упрощенной формулы (пренебрежением по сравнению с сопротивлением R_m величиной R_N) не всегда возможно.

Действительно, задавшись отношением истинного значения величины R_m к определяемому приближенно R_m , можем положить, например,

для формулы $R_x = R_N + \frac{R_N^2}{R_m - R_N}$

$$\frac{R_m}{R_{m_0}} \geq 0,999999,$$

что дает для необходимого сопротивления шунта:

$$\frac{R_m}{R_{m_0}} \geq 1 - \frac{R_N^2}{R_{m_0}^2},$$

откуда

$$R_{m_0}^2 \geq \frac{R_N^2}{1 - 0,999999} \quad \text{или} \quad R_{m_0} \geq R_N \cdot 10^3.$$

Только в том случае можно пользоваться приближительной формулой, если сопротивление шунта будет порядка $R_N \cdot 10^3 \Omega$, но не меньше. Выполнение последнего условия доставляет значительные трудности при измерениях, больших по номинальному значению катушек сопротивления. Например, для измерения с эталоном $R_N = 10\,000 \Omega$ и выше

необходимо наличие шунта сопротивлением нескольких мегом, что практически неудобно. Поэтому в подобных случаях при определении цены деления применялось последовательное подключение к эталону добавочного небольшого эталонного сопротивления ΔR_N , откуда цена деления C_0

$$+ C_0 = \frac{\Delta R_N}{\varphi_0}$$

Погрешность измерения

Как указывалось выше, при измерении сопротивления R_x можно пользоваться двумя методами (положим, что $R_N > R_x$):

- 1) методом сведения полученного отклонения к нулю;
- 2) методом отклонения.

Соответственно с этим будут иметь место следующие расчетные формулы:

$$|R_x|_1 = R_N - \frac{R_N^2}{R_m + R_N}$$

$$R_x|_2 = R_N - C_0(\varphi_1 - \varphi_0) = R_N - \frac{R_N^2(\varphi_1 - \varphi_0)}{R_m(\varphi - \varphi_0)} \left(\frac{1}{1 + \frac{R_N}{R_m}} \right) =$$

$$= R_N - \frac{R_N^2 \varphi_1 - \varphi_0}{R_m \varphi - \varphi_0} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{R_N}{R_m} + \frac{3}{8} \left(\frac{R_N}{R_m} \right)^2 - \dots \right] \approx R_N -$$

$$- \frac{R_N^2 \varphi_1 - \varphi_0}{R_m \varphi - \varphi_0} + \frac{1}{2} \frac{R_N^3 \varphi_1 - \varphi_0}{R_m^2 \varphi - \varphi_0}$$

Отсюда для относительной погрешности, полагая $R_N \approx R_m$:

$$\left| \frac{\Delta R_x}{R_x} \right|_1 = \sqrt{\left[1 - 2 \left(\frac{R_N}{R_m} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta R_N}{R_N} \right)^2 + \left(\frac{R_N}{R_m} \right)^2 \left(\frac{\Delta R_m}{R_m} \right)^2}$$

Аналогично для метода отклонения, полагая $\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} = \frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0} = \frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0} = \frac{\Delta \varphi}{\varphi}$

пренебрегая членами с $\left(\frac{R_N}{R_m} \right)^2$ по сравнению с единицей, получим

$$\left| \frac{\Delta R_x}{R_x} \right|_2 = \sqrt{\frac{\left[1 - 2 \frac{R_N}{R_m} \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\varphi - \varphi_0} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta R_N}{R_N} \right)^2 + \left(\frac{R_N}{R_m} \right)^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\varphi - \varphi_0} \right)^2 \left(\frac{\Delta R_m}{R_m} \right)^2 + \left(\frac{R_N}{R_m} \right)^2 \left[\frac{(\varphi_1^2 + \varphi_0^2)(\varphi - \varphi_0)^2 + (\varphi_1 - \varphi_0)(\varphi^2 + \varphi_0^2)}{(\varphi - \varphi_0)^4} \right] \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi} \right)^2}$$

На практике выражения в скобках, зависящие от углов отчета, значительно меньше единицы (особенно, если $\varphi - \varphi_0 > \varphi_1 - \varphi_0$), поэтому относительная ошибка в определении по второму методу будет не больше чем:

$$\left[\frac{\Delta R_x}{R_x} \right]_2 = \sqrt{\left[1 - 2 \left(\frac{R_N}{R_m} \right) \right]^2 \left(\frac{\Delta R_N}{R_N} \right)^2 + \left(\frac{R_N}{R_m} \right)^2 \left(\frac{\Delta R_m}{R_m} \right)^2 + \left(\frac{R_N}{R_m} \right)^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi} \right)^2}$$

Отсюда:

$$\left[\frac{\Delta R_x}{R_x}\right]_2 \approx \sqrt{\left[\frac{\Delta R_x}{R_x}\right]_1^2 + \left(\frac{R_N}{R_x}\right)^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi}\right)^2}$$

Здесь можно показать, пользуясь данными приведенного выше примера, что наибольшее значение при определении $\frac{\Delta R_x}{R_x}$ имеет поправка на величину сопротивления эталона R_N . В то время как при нормальных измерениях, принимая $\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = 0,25\%$, погрешность на отсчет по шкале оказывает влияние уже на следующий знак (0,0001%), погрешность в определении сопротивления шунта имеет еще меньшее значение. Отсюда в пределах норм¹ можно положить

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_N}{R_N} = 0,001\%$$

при измерениях обоими методами.

В качестве примера приведем данные измерения катушек сопротивления разными способами: методом дифференциального гальванометра и компенсационной схемой.

Таблица 4

Метод дифференциального гальванометра R_1	Компенсационная схема R_{II}	Разница $R_1 - R_{II} = \Delta R$	$\frac{\Delta R}{R_{\text{номин.}}}$, %
0,999997	0,99998 ₅	0,00001 ₁	0,011
0,99991 ₀	0,99982 ₅	0,00009 ₄	0,009 ₄
1,00003 ₂	1,00001 ₁	0,00002 ₁	0,002 ₁
1,00006 ₃	1,00004 ₅	0,00002 ₀	0,002 ₀
1,00003 ₄	1,00002 ₀	0,00001 ₀	0,001 ₀
9,9992 ₀	9,9991 ₇	0,00003 ₃	0,0003 ₃
9,9993 ₂	9,9991 ₀	0,0002 ₂	0,002 ₂
99,984 ₁	99,982 ₀	0,002 ₁	0,002 ₁
99,982 ₂	99,982 ₀	0,000 ₂	0,000 ₂
99,983 ₀	99,983 ₀	0	0
999,89 ₂	999,89 ₀	0,00 ₂	0,000 ₂
999,945 ₀	999,94 ₀	0,00 ₀	0,0000 ₀

В таблице 4, в графе 1 приведены измерения катушек, произведенные по методу дифференциального гальванометра, в графе 2 соответственно тех же катушек компенсационной схемой в Эталонной электрической лаборатории ВНИИМа. В графе 3 вычислено расхождение по абсолютной величине сопротивлений катушки. Здесь надо отметить, что во всех случаях приведенных измерений ΔR имеет положительное значение. Указанные измерения производились в период 1933—35 гг.

¹ Ост 7271.

Из рассмотрения графы 4 также следует, что при измерении малых по номинальному значению сопротивлений (0,1 Ω) процент расхождения возрастает, в то время как при измерениях образцов в 100 и 1000 Ω

$\frac{\Delta R}{R_{\text{номинальному}}}$ — уменьшается (0; 0,0005; и т. д.).

Это в известной мере согласуется с предыдущими рассуждениями [(формула (7))].

Определение температурных коэффициентов α и β

Обозначая через R_1, R_2, R_3 значения сопротивлений при известных температурах t_1, t_2, t_3 , получим следующего вида уравнения:

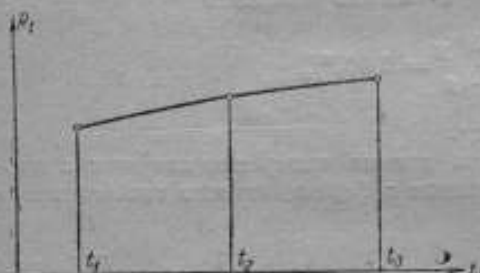


Рис. 8.

$$R_1 = R + \alpha \Delta t_1 + \beta \Delta t_1^2$$

$$R_2 = R + \alpha \Delta t_2 + \beta \Delta t_2^2$$

$$R_3 = R + \alpha \Delta t_3 + \beta \Delta t_3^2$$

где:

$$\Delta t_1 = t_1 - 20;$$

$$\Delta t_2 = t_2 - 20;$$

$$\Delta t_3 = t_3 - 20.$$

Решая данную систему относительно α и β , получим:

$$\alpha = \frac{(R_2 - R_1)(t_3 - t_2)(t_2 + t_3 - 40) - (R_3 - R_2)(t_3 - t_1)(t_2 - t_1 - 40)}{(t_2 - t_1)(t_3 - t_1)(t_3 - t_2)}$$

$$\beta = \frac{(R_3 - R_2)(t_3 - t_1) - (R_2 - R_1)(t_3 - t_2)}{(t_2 - t_1)(t_3 - t_1)(t_3 - t_2)} \quad (10)$$

На основании уравнений (4 и 6) можно написать для сопротивления исследуемого образца при температурах t_1, t_2, t_3 :

$$R_1 = R_N + \frac{R_N^2}{R_m - R_N} \frac{\varphi_1}{\varphi_0}$$

$$R_2 = R_N + \frac{R_N^2}{R_m - R_N} \frac{\varphi_2}{\varphi_0} \quad (11)$$

$$R_3 = R_N + \frac{R_N^2}{R_m - R_N} \frac{\varphi_3}{\varphi_0}$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ — отсчеты по шкале установки, при установившейся температуре в баке с образцом t_1, t_2 и t_3 .

Положим при этом для определенности, что все отсчеты направлены в одну сторону и при этом $\varphi_3 > \varphi_2 > \varphi_1$. Последнее очевидно соответствует тому случаю, когда сопротивление исследуемого образца больше эталона.

Подставляя значения R_{11} , R_2 и R_3 в уравнение (10), получим:

$$\alpha = \frac{R_N^2}{(R_m - R_N) \tau_0} \times \frac{(\tau_2 - \tau_1)(t_3 - t_2)(t_2 + t_3 - 40) - (\tau_2 - \tau_3)(t_2 - t_1)(t_2 - t_1 - 40)}{(t_2 - t_1)(t_3 - t_1)(t_3 - t_2)}$$

$$\beta = \frac{R_N^2}{(R_m - R_N) \tau_0} \frac{(\tau_1 - \tau_2)(t_2 - t_1) - (\tau_2 - \tau_1)(t_3 - t_2)}{(t_2 - t_1)(t_3 - t_1)(t_3 - t_2)}. \quad (10a)$$

Положим, что измерения производятся через определенный интервал температур, при этом

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2,$$

откуда

$$t_2 + t_3 = 3t_2 - t_1; \quad t_3 - t_1 = 2(t_2 - t_1).$$

Тогда формула (10) упростится и будет иметь вид:

$$\alpha = \frac{R_N^2}{2\tau_0(R_m - R_N)} \cdot \frac{(\tau_2 - \tau_1)(3t_2 - t_1 - 40) - (\tau_2 - \tau_3)(t_1 + t_2 - 40)}{(t_2 - t_1)^2} =$$

$$= C_0 \frac{\tau_1(t_1 + 40 - 3t_2) + 4\tau_2(t_2 - 20) + \tau_3(40 - t_1 - t_2)}{(t_2 - t_1)^2}$$

$$\beta = \frac{R_N^2}{2\tau_0(R_m - R_N)} \cdot \frac{(\tau_1 - \tau_2)(t_2 - t_1) - (\tau_2 - \tau_1)(t_3 - t_2)}{(t_2 - t_1)^2} =$$

$$= C_0 \frac{\tau_1 + \tau_3 - 2\tau_2}{(t_2 - t_1)^2}. \quad (10б)$$

Приведем пример на применение формул (10), рассмотрев данные измерений образцовой катушки сопротивления, изготовленной заводом „Эталон“ 100 Ω номинального сопротивления.

Рабочий эталон № 39 $R_N = 99,992_4$ при 20° .

Температура исследуемой катушки	Отклонения гальванометра	Сопротивление катушки
$t_1 = 17,6$	$\tau_1 = 43,25$ без шунта $\tau_0 = 189,25$ с шунтом	$R_1 = 99,998_3$
	$R_m = 5 \cdot 10^5$	
$t_2 = 22,7$	$\tau_2 = 115,0$ без шунта	$R_2 = 100,00^{\circ}_2$
$t_3 = 27,8$	$\tau_3 = 165,75$ без шунта	$R_3 = 100,015_1$

Откуда при $t = 20^\circ$

$$\alpha = 0,0019_6;$$

$$\beta = 0,00005_{75};$$

$$R = 100,0033_0.$$

¹ Вычисления и измерения произведены К. П. Любомудровой.

На основании формул (106), с помощью которых практически производится определение температурных коэффициентов α и β , подсчитаем погрешность результата, т. е.

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \text{ и } \frac{\Delta\beta}{\beta}.$$

На основании известных положений можно написать:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha}{\partial R_N} \cdot \frac{\Delta R_N}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial R_m} \cdot \frac{\Delta R_m}{\alpha}\right)^2 + \sum_{i=0}^{i-1} \left(\frac{\partial\alpha}{\partial \varphi_i} \cdot \frac{\Delta \varphi_i}{\alpha}\right)^2 + \sum_{i=1}^{i-2} \left(\frac{\partial\alpha}{\partial t_i} \cdot \frac{\Delta t_i}{\alpha}\right)^2}.$$

Для простоты будем выписывать каждое из слагаемых по отдельности, обозначив при этом:

$$\varphi_1(t_1 + 40 - 3t_2) + 4\varphi_2(t_2 - 20) + \varphi_3(40 - t_1 - t_2) = A$$

$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial R_N} \cdot \frac{\Delta R_N}{\alpha}\right)^2 = \left(\frac{2R_m - R_N}{R_m - R_N}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_N}{R_N}\right)^2$$

$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial R_m} \cdot \frac{\Delta R_m}{\alpha}\right)^2 = \left(\frac{R_m}{R_m - R_N}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_m}{R_m}\right)^2$$

$$\sum_{i=0}^{i-3} \left(\frac{\partial\alpha}{\partial \varphi_i} \cdot \frac{\Delta \varphi_i}{\alpha}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0}\right)^2 + \left[\frac{(t_1 + 40 - 3t_2)\varphi_1}{A}\right]^2 \left(\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1}\right)^2 +$$

$$+ \left[\frac{4(t_2 - 20)\varphi_2}{A}\right]^2 \left(\frac{\Delta \varphi_2}{\varphi_2}\right)^2 + \frac{(40 - t_1 - t_2)^2}{A^2} \left(\frac{\Delta \varphi_3}{\varphi_3}\right)^2$$

$$\sum_{i=1}^{i-2} \left(\frac{\partial\alpha}{\partial t_i} \cdot \frac{\Delta t_i}{\alpha}\right)^2 = \left[\frac{(\varphi_1 - \varphi_2)t_1}{A} + \frac{2t_1}{t_2 - t_1}\right]^2 \left(\frac{\Delta t_1}{t_1}\right)^2 +$$

$$+ \left[\frac{(4\varphi_2 - 3\varphi_1 - \varphi_3)t_2}{A} - \frac{2t_2}{t_2 - t_1}\right]^2 \left(\frac{\Delta t_2}{t_2}\right)^2$$

или принимая во внимание принцип равных влияний, положим, что

$$\frac{\Delta R_N}{R_N} = \frac{\Delta R_m}{R_m}, \quad \frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0} = \frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} = \frac{\Delta \varphi_2}{\varphi_2} = \frac{\Delta \varphi_3}{\varphi_3}, \quad \frac{\Delta t_1}{t_1} = \frac{\Delta t_2}{t_2},$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = & \sqrt{\frac{5R_m^2 - 4R_m R_N + R_N^2}{(R_m - R_N)^2} \left(\frac{\Delta R_N}{R_N}\right)^2 +} \\ & + \sqrt{\left[1 + \frac{(t_1 + 40 - 3t_2)^2 \varphi_1^2 + 16(t_2 - 20)^2 \varphi_2^2 + (40 - t_1 - t_2)^2 \varphi_3^2}{A^2}\right] \left(\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1}\right)^2 +} \\ & + \sqrt{+ 4 \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 t_1^2 + (4\varphi_2 - 3\varphi_1 - \varphi_3)^2 t_2^2}{A^2} + 4 \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) t_1^2 - t_2^2 (4\varphi_2 - 3\varphi_1 - \varphi_3)}{A(t_2 - t_1)} +} \\ & + \sqrt{+ 4 \frac{t_2^2 + t_1^2}{(t_2 - t_1)^2} \left(\frac{\Delta t_1}{t_1}\right)^2}. \end{aligned}$$

Рассматривая порядок величин $\frac{\Delta R_N}{R_N}$; $\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1}$ и $\frac{\Delta t_1}{t_1}$, следует отметить, что погрешность в определении этих величин различна. Действительно, величина сопротивления рабочего эталона I класса задается с точностью, ограничиваемой компенсационной схемой в пределах 0,001%, ошибка при отсчете по шкале прибора может быть принята (в абсолютных цифрах) как 0,25 деления, что дает в наших измерениях погрешность порядка $\frac{0,25}{100} = 0,25\%$; отсчет по шкале термометра может быть сделан в условиях лаборатории с точностью до 0,025°, что соответствует погрешности в 0,166—0,083%.

Отсюда следует, что величиной $\frac{\Delta R_N}{R_N}$ в этом случае можно пренебрегать, считая тем самым, что практически поправка в определении температурного коэффициента не зависит от ошибки в определении значения эталона, т. е.

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{B \left(\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} \right)^2 + C \left(\frac{\Delta t_1}{t_1} \right)^2},$$

где

$$B = 1 + \frac{(t_1 + 40 - 3t_2)^2 \varphi_1^2 + 16(t_2 - 20)^2 \varphi_2^2 + (40 - t_1 - t_2)^2 \varphi_3^2}{A^2}$$

$$C = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 t_1^2 + (4\varphi_2 - 3\varphi_1 - \varphi_3)^2 t_2^2}{A^2} +$$

$$+ 4 \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) t_1^2 - t_2^2 (4\varphi_2 - 3\varphi_1 - \varphi_3)}{A(t_2 - t_1)} + 4 \frac{t_2^2 + t_1^2}{(t_2 - t_1)^2}.$$

Переходя к определению величин B и C , можно отметить, что B имеет порядок 1, а то время как C несколько десятков (50—60). Величина сопротивления образца должна быть установлена с погрешностью, не превышающей 0,001%, откуда следует, что значение $\frac{\Delta \alpha}{\alpha}$ должно быть не больше 2,5%. Действительно, для имеющейся в лаборатории проволоки типа манганина (из нее наматываются образцы) можно принять, что $\alpha = (2 \approx 4) 10^{-5} \cdot R_N$; кроме того, известно,¹ что максимальное значение температуры, до которой может быть нагрет образец, равно 30°. Тогда из рассмотрения уравнения $R_{N_t} \approx R_N + \alpha \Delta t$ следует, что:

$$\Delta t \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \leq 1 \cdot 10^{-5} \quad \text{или} \quad 10 \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \approx 0,025,$$

что даст:

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = 2,5\%.$$

Пользуясь последними соображениями, возможно выяснить, с какой точностью необходимо производить отсчет по термометрам, указывающим температуру в баке с образцом и эталоном. Приняв

$$\frac{\Delta t_1}{t_1} = \frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1}$$

имеем:

$$0,025 = \sqrt{B+C} \frac{\Delta t_1}{t_1}; \quad \frac{\Delta t_1}{t_1} = \frac{2,5}{\sqrt{B^2+C^2}} \text{‰}$$

Применяя последнюю формулу к указанному выше примеру, получим:

$$\frac{\Delta t_1}{t_1} \approx \frac{2,5}{\sqrt{63}} \text{‰} \approx 0,32 \text{‰}$$

Отсюда ясно, что при экспериментальном определении коэффициента α необходимо крайне тщательно отсчитывать по термометрам. В лабораторной практике подогрев или охлаждение бака термостата останавливают за некоторое время до отсчета и выжидают, пока во всех местах бака не выровняется температура. Для этой цели в различных местах бака установлены отдельные термометры. Кроме того, в тех случаях, когда это требуется при наличии значительных температурных градиентов, производится отсчет по термометру до измерения и соответственно после, что занимает примерно 1—2 минуты. Результат обычно принимают, как среднее.

Перехода к определению поправки величины β , можно написать:

$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial R_N} \frac{\Delta R_N}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial R_m} \frac{\Delta R_m}{\beta}\right)^2 + \sum_{i=0}^{i=2} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \varphi_i} \frac{\Delta \varphi_i}{\beta}\right)^2 + \sum_{i=1}^{i=2} \left(\frac{\partial \beta}{\partial t_i} \frac{\Delta t_i}{\beta}\right)^2}$$

Переписывая каждое из слагаемых по отдельности:

$$\left(\frac{\partial \beta}{\partial R_N} \frac{\Delta R_N}{\beta}\right)^2 = \left(\frac{2R_m - R_N}{R_m - R_N}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta R_N}{R_N}\right)^2 \quad \left(\frac{\partial \beta}{\partial R_m} \frac{\Delta R_m}{\beta}\right)^2 = \left(\frac{R_m}{R_m - R_N}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_m}{R_m}\right)^2$$

$$\sum_{i=0}^{i=2} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \varphi_i} \frac{\Delta \varphi_i}{\beta}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1}\right)^2 + \left(\frac{2\varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta \varphi_2}{\varphi_2}\right)^2 +$$

$$+ \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta \varphi_2}{\varphi_2}\right)^2$$

$$\sum_{i=1}^{i=2} \left(\frac{\partial \beta}{\partial t_i} \frac{\Delta t_i}{\beta}\right)^2 = 4 \left[(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_2) \frac{t_1}{t_2 - t_1} \right]^2 \left(\frac{\Delta t_1}{t_1}\right)^2 +$$

$$+ 4 \left[(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_2) \frac{t_2}{t_2 - t_1} \right]^2 \left(\frac{\Delta t_2}{t_2}\right)^2$$

считая также, что

$$\frac{\Delta R_N}{R_N} = \frac{\Delta R_m}{R_m}, \quad \frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0} = \frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} = \frac{\Delta \varphi_2}{\varphi_2} = \frac{\Delta \varphi_3}{\varphi_3}, \quad \frac{\Delta t_1}{t_1} = \frac{\Delta t_2}{t_2}$$

и принимая во внимание соображения относительно величины поправки $\frac{\Delta R_N}{R_N}$, можно написать:

$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = \sqrt{D \left(\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} \right)^2 + E \left(\frac{\Delta t_1}{t_1} \right)^2},$$

где

$$D = 1 + \frac{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2}{(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3)^2}; \quad E = 4(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3)^2 \frac{t_2^2 + t_1^2}{(t_2 - t_1)^2}.$$

Подсчитывая коэффициенты D и E , можно показать, что $E \gg D$ (например 200 и 60 000), поэтому необходимо при измерениях также тщательно отсчитывать по термометрам.

Перейдем теперь к определению необходимой в этом случае точности отсчета по термометру. На основании формулы температурной зависимости, можно написать:

$$\Delta t^2 \frac{\beta}{R_N} \frac{\Delta \varphi}{\beta} \leq 1 \cdot 10^{-6};$$

принимая так же, как и раньше, допустимым нагрев образца до 30°.

Для применяемой проволоки можно считать $\beta \approx (2 \approx 5) \cdot 10^{-7}$; тогда на основании подобных же рассуждений, как и для α , получим, что:

$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = 20 - 25\%,$$

т. е. ошибка в определении температурного коэффициента β на 25% может вызвать изменение сопротивления образца, при максимально возможной разнице температур в 10° — на 0,001%. Отсюда, принимая

$$\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} = \frac{\Delta t_1}{t_1},$$

получим

$$0,25 = \sqrt{D + E} \left(\frac{\Delta t_1}{t_1} \right).$$

Пользуясь данными приведенного выше примера, получим:

$$0,25 \approx 256 \frac{\Delta t_1}{t_1},$$

откуда

$$\frac{\Delta t_1}{t_1} \approx 0,1\%.$$

т. е. опять будет уместно отметить на необходимость возможно более тщательных отсчетов по термометрам.

Заключение

Переходя к оценке метода, на основании опыта лаборатории можно отметить его удобство и надежность.

Как указывалось выше, при измерении сопротивлений точность метода вполне достаточна, имея порядок 0,001—0,0001%. В этом случае, при тщательном отсчете отклонения гальванометра, можно считать

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_N}{R_N},$$

что соответствует точности компенсационного метода.

При подсчетах температурных коэффициентов α и β и связанных с этим измерений сопротивления объекта при разных температурах, следует указать на надежность метода, дающего возможность определить температурные коэффициенты с погрешностью $\frac{\Delta \alpha}{\alpha} < 5\%$ и $\frac{\Delta \beta}{\beta} < 25\%$, применяя термометр, разделенный только до 0,1°. В этом случае следует указать еще на целый ряд преимуществ метода дифференциального гальванометра. Можно утверждать, что при выполнении условий: $r_1 = r_2$; $S_{11} = S_{22}$; $I = \text{const.}$ получим отклонение $\varphi = 0$, а тогда имеет место равенство $R_x = R_N$ без влияния температуры, сопротивления соединительных проводов, э.д.с. и т. д. Кроме того, следует отметить, что совершенно нет необходимости иметь сопротивления самих обмоток гальванометра строго одинаковыми.

С чисто практической точки зрения можно отметить удобство схемы, особенно для определения температурных коэффициентов при применении описанного выше переключателя Штейнвера, когда все измерения, соблюдая необходимую степень точности, производятся в течение нескольких минут.

В итоге следует указать, что каждый раз при метрологических измерениях этим методом следует особо тщательно относиться к отсчетам температуры, не забывать надежности изоляции всей соединительной проводки и производить измерение при вполне установившейся температуре термостатов.

I. Krotkoff

L'EMPLOI DU GALVANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL DANS LA MESURE DES RESISTANCES ET LA DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE TEMPERATURE

Résumé

1. On examine les correlations qui ont lieu dans le circuit d'un galvanomètre différentiel mis en circuit d'après le schème de Kohlrausch. On analyse la méthode de la mesure des résistances pour le cas des résistances égales et celui des résistances différentes des enroulements du galvanomètre. On démontre la possibilité de l'emploi de la méthode du galvanomètre différentiel pour mesurer avec une précision métrologique

les coefficients de temperature des bobines de resistances normales. On analyse un exemple concret.

II. On indique les sources des erreurs de la methode de Kohlrausch adaptee a la determination des coefficients de temperature α et β , on cite une serie d'avantages pratiques de la methode de galvanometre differentiel.

А. А. Чечулин

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ ПОВЕРКИ ИНДУКЦИОННОГО СЧЕТЧИКА

Наиболее существенное значение для суждения о качестве счетчика имеет величина коэффициента счетчика при разных нагрузках. Величина относительной погрешности показаний счетчика, нормированная § 20 ОСТ 6225, определяется по выражению

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{k_n - k}{k}$$

где k — фактический коэффициент счетчика, т. е. множитель, на который надо помножить отсчет счетчика, чтобы получить действительное значение энергии, израсходованное потребителем, а k_n — номинальное значение коэффициента счетчика. Последняя величина не должна быть отличной от целых степеней 10.

Зависимость значений $\frac{\Delta k}{k}$ или k от нагрузки определяет собой главным образом электрические качества счетчика. В отношении механических свойств счетчик характеризуется в основном вариациями погрешностей, получаемых при повторных поверках счетчика при одной и той же нагрузке. Допуски для вариаций погрешностей установлены § 30 ОСТ 6225.

Очевидно, точность результатов, полученных при определении упомянутых выше величин, главным образом будет зависеть от метода измерений, качества применяемых при поверке приборов, опытности поверителя.

Целью настоящей статьи является выяснение вопроса о том, в какой мере точность измерений при поверке влияет на точность получаемого опытом значения коэффициента счетчика и вариации этой величины.

§ 19 ОСТ 6225 нормирует точность измерения путем указания „допуска на точность измерения“ — 0,2% для счетчиков I класса и 0,5% для счетчиков II класса точности, а следовательно тем самым дает указание на необходимость применять методы измерений при определении погрешностей счетчика, по точности удовлетворяющие этим требованиям. Так как § 20 ОСТ 6225 дает значение наибольших допустимых погрешностей счетчика, то в целях единообразия при выяснении влияния различных факторов на точность поверки счетчика мы будем также определять предельные значения погрешностей измерений.

Принимая во внимание, что величиной, характеризующей процесс измерения, является „средняя квадратичная погрешность“ ряда измерений, за предельное значение случайной погрешности можно принять утроенное значение этой величины, основываясь на том, что вероятность получить при одном из немногих измерений случайную погрешность, превышающую такую предельную погрешность, чрезвычайно мала.

Как известно, счетчики поверяются либо путем измерения мощности и времени, т. е. ваттметрами и секундомерами, либо путем сравнения с так называемыми образцовыми (контрольными) счетчиками.

При поверке ваттметров коэффициент счетчика вычисляется по формуле

$$k = \frac{Pt}{cn},$$

где P — мощность в ваттах, учитываемая ваттметрами, включенными в сеть, t — продолжительность времени в секундах, в течение которого диск счетчика повернулся на n полных оборотов, и c — постоянная счетчика в ваттсекундах на один оборот диска. Эта величина определяется из указанного на счетчике переводного множителя.

Из перечисленных величины измерением определяются P , t и n , причем определение последних двух связано друг с другом фиксированием момента начала 1-го и конца n -го оборотов диска путем нажатия головки секундомера для пуска и остановки его.

Мощность P определяется путем отсчета по образцовому прибору класса 0,2 или 0,5, обычно электродинамического типа. Очевидно как измерение величины P , так и измерение величины $\frac{t}{n}$ внесет некоторую случайную погрешность в значение коэффициента счетчика.

Анализ технического процесса измерения величины $\frac{t}{n}$, применяемого в Лаборатории переменного тока ВНИИМ'а, позволяет определить среднюю погрешность измерения этой величины и установить ее предельное значение. Наблюдатель, имея перед собой 4 секундомера, в момент прохождения пятна диска в окне счетчика пускает в ход первый секундомер. Этот момент отмечается мысленным счетом „0“. При вторичном прохождении пятна при счете „1“ пускается в ход второй секундомер. Далее, при счете „2“ — третий и при счете „3“ — четвертый. При прохождении пятна после n -го оборота диска, т. е. при счете „ n “, останавливается первый секундомер, при счете „ $n + 1$ “ — второй и так далее до четвертого.

Момент прохождения пятна диска определяется положением на створе по лучу зрения двух точек: одного из краев (обычно переднего) или середины пятна с одной из кромок (обычно правой) или середины окна. При быстром вращении, т. е. при нагрузке свыше 100% от номинальной, оказывается возможным отметить лишь момент прохождения всего пятна мимо окна.

Погрешности при определении величин t и n , а следовательно, и отношения $\frac{t}{n}$ могут иметь своим источником следующие причины:

1) Операция пуска и ход секундомера отстают по времени от момента зрительной фиксации пятна диска на некоторый промежуток вре-

мени, определяемый продолжительностью рефлекса наблюдателя. Очевидно, что практически почти такое же по величине отставание должно иметь место и при остановке секундомера, а, следовательно, влияние этой причины на ошибку определения величины $\frac{t}{n}$ будет только тогда, когда отставание при пуске не будет равно отставанию при остановке. В последнем случае будет иметь место погрешность, подчиняющаяся закону случайных ошибок.

2) При пуске и остановке секундомеров направление луча зрения наблюдателя может составлять разные углы с нормалью к окну счетчика. Таким образом в течение t учтенных секунд диск повернется не на n оборотов, а на $n \pm \Delta n$. Знаки плюс и минус для этой погрешности равновозможны и ее надо отнести также к числу случайных. Эта погрешность измерения зависит от индивидуальности наблюдателя: у опытного наблюдателя погрешность определения величины $\frac{t}{n}$, возникающая вследствие этой причины, будет вообще очень малой и может оказать влияние на результат только при малых нагрузках счетчика.

3) Положение пятна диска фактически фиксируется не точкой, а дугой по окружности. Длина этой дуги пропорциональна скорости вращения диска n , следовательно, нагрузке счетчика.

Таким образом за время t , как и в предыдущем случае, диск повернется на $n \pm \Delta n$ оборотов и, следовательно, так как тот и другой знак погрешности равновозможны, и эта погрешность будет случайной.

4) Стрелка секундомера может быть эксцентричной по отношению к циферблату. Погрешность, возникающая вследствие этой причины, исключается при $t = 60$ сек и величине, кратной этой, так как положение стрелки при пуске и остановке секундомера будет одинаковым. При значении t , отличном от целого числа минут, в отсчет будет внесена систематическая погрешность, различная для различных значений t . Эта погрешность может быть исключена внесением соответствующей поправки, значение которой может быть найдено предварительным исследованием секундомера. В хороших секундомерах поправки на эксцентричность стрелки ниже порога чувствительности секундомера.

5) Секундомер может иметь неправильный ход. Для устранения погрешности, вносимой этой причиной, предварительная проверка и регулировка секундомера необходимы.

Таким образом последние две из упомянутых причин вносят систематическую погрешность, которая может быть учтена, и результаты исправлены. Первые же три являются источником случайных ошибок, для которых имеет место их нормальное распределение.

Для определения предельного значения величины $\frac{t}{n}$ можно применить статистический метод и по средней квадратичной погрешности ряда измерений вычислить искомую величину.

Принимая число n за точное, как целое заранее установленное число оборотов диска, и относим таким образом к величине t погрешность определения n , оказалось возможным вычислить интересующую нас предельную погрешность величины t в условиях метода проверки счетчика, применяемого в Лаборатории переменного тока ВНИИМ'а.

По лабораторному журналу испытания типов счетчиков было обработано 1000 последовательных определений t по четырем секундомерам. Отсчет по секундомеру округлялся до 0,2 сек, так как интерполяция в пределах этого промежутка времени затруднительна. Поэтому при статистическом обследовании измерений отсчеты по секундомеру были классифицированы по группам через 0,2 сек и по комбинациям показаний 4 секундомеров.

Обозначая наименьшее из показаний через t , для показаний каждого из остальных трех секундомеров получали значения $t + \tau$, где τ имело значение 0, 0,2, 0,4, 0,6 и в очень редких случаях 0,8. Все 1000 обработанных наблюдений (4000 отсчетов) были распределены по группам, соответствующим различным комбинациям значений τ . Результаты упомянутой обработки, которые позволяют сделать ряд заключений, приведены в таблице 1. Сравнение данных первой серии в 500 наблюдений с данными второй серии указывают на полное подобие распределения по различным комбинациям τ в обеих сериях. Этот факт позволяет с большой вероятностью утверждать, что оно не случайно, а определяется специфическими особенностями метода измерения t .

Если учесть, что обработанные 1000 наблюдений представляют собой все записи показаний секундомеров в журнале Лаборатории переменного тока (№ 10, стр. 1—90 — первая серия и стр. 91—199 — вторая серия), взятые из журнала подряд, то очевидно, что приведенное распределение по комбинациям определяется в числе прочих факторов и индивидуальными ошибками всех сотрудников Лаборатории и особенностями испытанных за это время счетчиков. Различным составом наблюдателей и различными счетчиками можно объяснить некоторое расхождение между данными первой и второй серии наблюдений.

Из таблицы 1 также видно, что громадное большинство показаний секундомеров — 92,3% для первой серии, 88,8% для второй и 89,7% для всех 1000 наблюдений падает на все возможные 10 комбинаций из значений $\tau = 0$, $\tau = 0,2$ и $\tau = 0,4$. Из этого числа показаний 61,6% для первой серии, 59,4% для второй и 56% для обеих серий падает на комбинации, содержащие только $\tau = 0$ и $\tau = 0,2$.

Из этого материала следует, что средняя квадратичная погрешность результата, полученного по показаниям 4 секундомеров, определяемая из выражения

$$S_s = \sqrt{\frac{\sum (\Delta \tau)^2}{4 \cdot 3}}$$

меняется от 0 для комбинации № 1 до 0,231 сек для комбинации № 26.

Среднее значение средних квадратичных ошибок, учитывая вес их, определяется из выражения

$$S = \frac{\sum S_s \cdot p}{\sum p}$$

Для первой серии наблюдений эта величина получается равной 0,0657 сек, для второй 0,0749 сек и для всех 1000 наблюдений — 0,0703 сек.

В таблице 2 дано распределение отсчетов по отклонениям от среднего арифметического. Для наглядности эти данные представлены также диаграммами рис. 1 для 1-й серии, рис. 2 — для 2-й серии и рис. 3 —

Таблица 1

№№ по поп.	Комбинация показаний секундомеров				Среднее арифметическое значение \bar{x}	Отклонение от среднего				Число наблюдений		Всего ρ	Средняя квадратичная погрешность результата по показаниям одной комбинации	$S_{\rho 1}$	$S_{\rho 4}$	S_{ρ}		
	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4		$\Delta \tau_1$	$\Delta \tau_2$	$\Delta \tau_3$	$\Delta \tau_4$	первой серии ρ_1	второй серии ρ_2							
1	0	0	0	0	0	0	0	0	65	34	100	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0,2	-0,05	-0,05	-0,05	0	73	71	144	0,050	3,55	7,20	3,55	7,20		
3	0	0	0,2	0,2	-0,10	-0,10	-0,10	0,10	122	96	218	0,057	5,47	12,43	5,47	12,43		
4	0	0,2	0,2	0,2	0,15	0,05	0,05	0,05	47	51	98	0,050	2,35	4,90	2,35	4,90		
5	0	0,2	0,2	0,4	0,20	0	0	0,20	79	70	149	0,082	5,48	12,21	5,48	12,21		
6	0	0	0,2	0,4	0,15	0,15	0,05	0,25	34	44	78	0,096	3,26	7,49	3,26	7,49		
7	0	0	0	0,4	0,10	0,10	0,10	0,30	3	8	11	0,100	0,30	1,10	0,30	1,10		
8	0	0,2	0,4	0,4	0,25	0,05	0,15	0,15	31	38	69	0,096	3,63	8,62	3,63	8,62		
9	0	0,4	0,4	0,4	0,30	0,10	0,10	0,10	3	9	12	0,100	0,30	1,20	0,30	1,20		
10	0	0,2	0,4	0,6	0,20	0,20	0,20	0,20	5	13	18	0,115	0,58	2,07	0,58	2,07		
11	0	0,2	0,4	0,6	0,25	0,05	0,05	0,35	5	8	13	0,126	0,63	1,64	0,63	1,64		
12	0	0,4	0,4	0,6	0,35	0,05	0,05	0,25	4	6	9	0,136	0,50	1,13	0,50	1,13		
13	0	0,2	0,4	0,6	0,30	0,10	0,10	0,30	13	18	31	0,129	1,68	4,00	1,68	4,00		
14	0	0,2	0,4	0,8	0,35	0,15	0,05	0,45	0	1	1	0,132	0	0,13	0,13	0,13		
15	0	0,2	0,4	0,6	0,20	0,20	0	0,40	0	4	6	0,141	0,28	0,85	0,28	0,85		
16	0	0,4	0,6	0,6	0,40	0	0,20	0,40	2	2	4	0,141	0,28	0,56	0,28	0,56		
17	0	0	0	0,6	0,15	0,15	0,15	0,45	0	2	4	0,150	0	0,15	0,15	0,15		
18	0	0	0,4	0,6	0,25	0,25	0,15	0,35	0	1	1	0,150	0	0,15	0,15	0,15		
19	0	0,2	0,6	0,6	0,35	0,15	0,25	0,25	0	5	5	0,150	0	0,75	0,75	0,75		
20	0	0,6	0,6	0,6	0,45	0,15	0,15	0,45	2	3	5	0,150	0	0,75	0,75	0,75		
21	0	0,4	0,4	0,8	0,40	0	0	0,40	3	2	5	0,150	0,45	0,75	0,45	0,75		
22	0	0	0,6	0,6	0,30	0,30	0,30	0,30	0	1	1	0,163	0,45	0,16	0,45	0,16		
23	0	0,2	0,6	0,8	0,40	0,20	0,20	0,40	1	5	6	0,173	0,17	0,87	0,17	1,04		
24	0	0,4	0,6	0,8	0,45	0,05	0,15	0,25	1	5	6	0,182	0,18	0,91	0,18	1,09		
25	0	0	0,6	0,8	0,35	0,35	0,15	0,45	1	3	4	0,194	0,19	0,58	0,19	0,78		
26	0	0	0,8	0,8	0,40	0,40	0,40	0,40	1	2	3	0,206	0,21	0,41	0,21	0,62		
									2	1	3	0,231	0,46	0,33	0,46	0,69		
									500	500	1000	Сумма	32,82	37,45	70,31	32,82	37,45	70,31

Отклонения от среднего отсчетов секундомера

	-0,50	-0,45	-0,40	-0,35	-0,30	-0,25	-0,20	-0,15	-0,10	0	+0,05	+0,10	+0,15	+0,20	+0,25	+0,30	+0,35	+0,40	+0,45	+0,50	
1) В первой серии . . .	—	4	7	8	18	36	94	117	266	2425	183	266	145	94	43	18	6	7	1	—	
2) Во второй серии . . .	—	5	10	13	37	56	109	146	234	284	208	237	161	105	57	36	16	12	4	—	
3) Всего	—	9	17	21	55	92	203	263	500	526	391	503	306	199	100	54	22	19	5	—	
То же при округлении отклонений до 0,1 сек:																					
4) В первой серии . . .	2	—	13	—	40	—	170,5	—	455	—	648	—	430	—	188	—	42,5	—	10,5	—	0,5
5) Во второй серии . . .	2,5	—	19	—	71,5	—	210	—	442	—	523	—	421,5	—	214	—	72,5	—	22	—	2
6) Всего	4,5	—	32	—	111,5	—	380,5	—	897	—	1171	—	851,5	—	402	—	115	—	32,5	—	2,5

для всех 4000 наблюдений. Эти результаты повидимому указывают на то, что в наблюдения были внесены какие-то систематические погрешности. На приведенных диаграммах совершенно явно обнаруживается, что отсчеты, дающие среднее арифметическое из четырех наблюдений с сотыми секунды, встречаются несколько реже, чем это следует из нормального распределения. Особенно заметно это на числах отклонений $-0,05$ и $+0,05$. В последнем случае особенно резко заметен провал на всех трех диаграммах. Если округлить отклонения до $0,1$ сек, то получаются результаты, более близкие к нормальному распределению. В нижних трех строках таблицы 2 и на рис. 4 (1-я серия), рис. 5 (2-я серия) и рис. 6 (все наблюдения) даны результаты такого распределения.

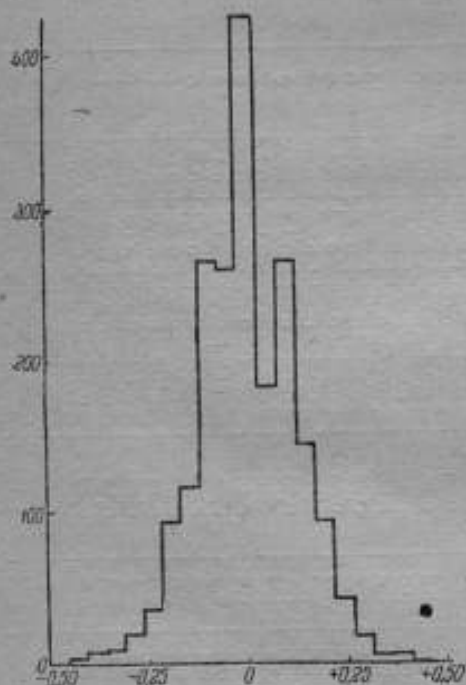


Рис. 1.

145 отсчетов. По 72,5 отсчета были прибавлены к числам отклонений $0,10$ сек—266 и $0,20$ сек—94. К последнему числу была прибавлена половина отсчетов при отклонении $0,25$, т. е. $\frac{43}{2} = 21,5$, к первому—

половина числа отклонений $0,05$ сек., т. е. $\frac{183}{2} = 91,5$. Таким образом число отклонений, равных $0,2$ сек, получилось равным

$$95 + 21,5 + 72,5 = 188,$$

а число отклонений, равных $0,1$ сек:

$$266 + 72,5 + 91,5 = 430.$$

Наиболее вероятным, по мнению автора, объяснением наблюдаемого отклонения от нормального распределения будет следующее. Наблюдатель, бессознательно округляя отсчет до $0,2$ сек, в сомнительных случаях округляет его так, чтобы среднее арифметическое наблюдение определялось числом, не содержащим сотых долей секунды. Таким образом при наблюдениях бессознательно отдается предпочтение комбинациям 1, 3, 5, 7, 9 и 10 и т. д. перед комбинациями 2, 4, 6, 8, 11, 12 и т. д.

Сравнительно большое число наблюдений, содержащих $\tau = 0,6$ сек и $\tau = 0,8$ сек, повидимому указывает на имевшие место кратковременные изменения скорости вращения диска за промежуток времени между моментами пуска 1-го и 4-го секундомеров или между моментами остановки их. Это возможно при совпадении с этими промежутками времени начала или конца перехода 2-й или 3-й цифр счетного механизма, т. е. изменения трения в этом механизме. Такое явление служит источником вариаций погрешностей счетчика.

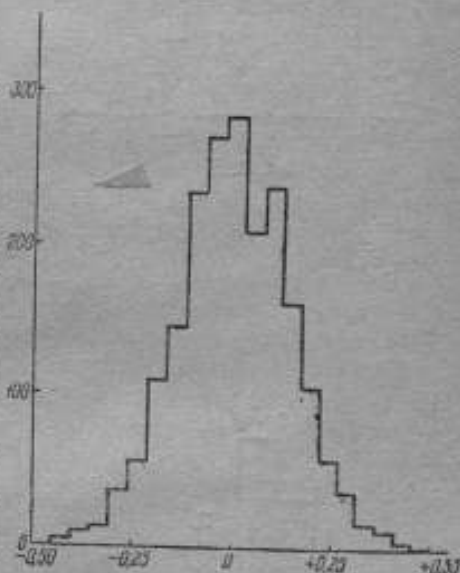


Рис. 2.

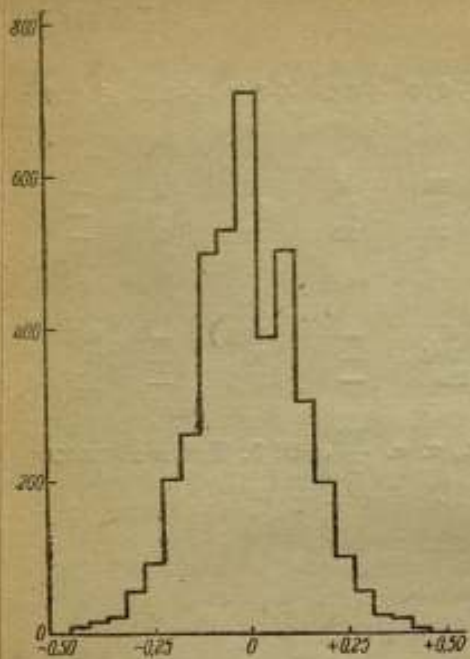


Рис. 3.

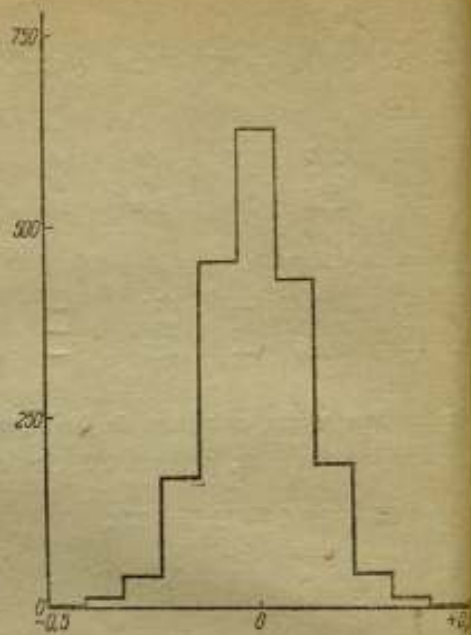


Рис. 4.

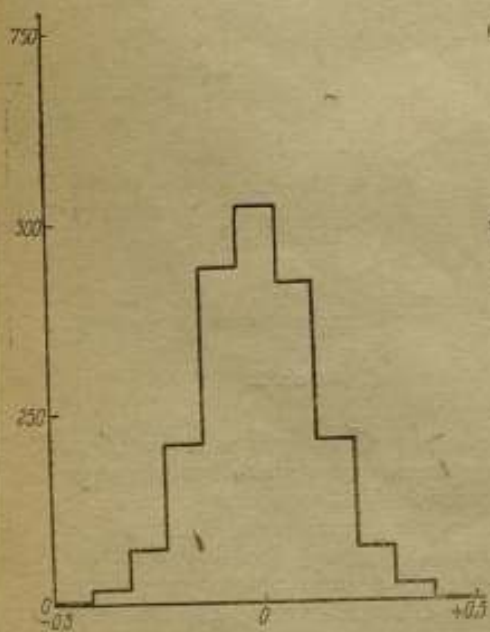


Рис. 5.

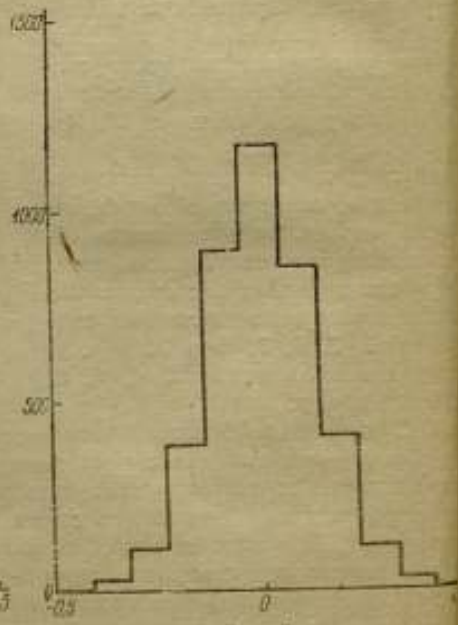


Рис. 6.

В условиях технического процесса поверки счетчика выделение только-что упомянутых систематических погрешностей и внесение соответствующих поправок практически невозможно. Поэтому полагая, что при работах различных наблюдателей и с различными счетчиками упомянутые погрешности могут иметь различные знаки, мы можем их отнести к числу „условно случайных“ и воспользоваться материалом таблиц 1 и 2 для определения предельной погрешности при определении t .

Найденная выше величина S — среднее арифметическое из средних квадратичных погрешностей результата, определенного по показаниям 4-х секундомеров, характеризует точность применяемого метода измерения и является величиной, эквивалентной средней квадратичной погрешности ряда в 1000 определений значения t . Поэтому для предельного значения случайной погрешности δ_1 получим:

$$\delta_1 = 3S = 3 \cdot 0,0703 = 0,21 \text{ сек.}$$

Для однократного наблюдения по секундомеру средняя квадратичная погрешность ряда наблюдений

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta t)^2}{n-1}}$$

определяется по материалам таблицы 2.

По данным	1-й строки	$\sigma = 0,128$	сек
"	"	2-й	" $\sigma = 0,148$ "
"	"	3-й	" $\sigma = 0,138$ "
"	"	6-й	" $\sigma = 0,142$ "

Принимая $\sigma = 0,14$ сек, получаем для предельного значения случайной погрешности однократного наблюдения t по одному секундомеру при поверке счетчика следующее значение:

$$\delta_1 = 3\sigma = 0,42 \text{ сек.}$$

что превышает в $\sqrt{4}$ раз предельную погрешность однократного измерения 4 секундомерами, как это и следует по теории ошибок.

Относительная погрешность при определении величины t будет зависеть от абсолютного значения этой величины. При измерениях в Лаборатории переменного тока ВНИИМ'а число оборотов диска n обычно выбирается таким, чтобы t было около 1 мин. В этом случае значение t практически заключается в пределах от 50 до 65 сек, и, следовательно, относительная средняя квадратичная погрешность результата измерения величины t по 4 секундомерам будет от $\frac{0,07}{50}$

до $\frac{0,07}{65}$, т. е. от 0,14 до 0,11% и предельная — от 0,42 до 0,33%

При наблюдениях по одному секундомеру при $t = 50-65$ сек для предельной погрешности t , получим значение от 0,84 до 0,66%.

Приведенные значения погрешностей, конечно, относятся только к определению по секундомерам времени t при поверке и испытании счетчиков.

Как показывает наблюдение, опытность наблюдателя в отношении погрешности измерения t существенной роли не играет, так как необходимые навыки для этого измерения приобретаются чрезвычайно быстро. Утомление наблюдателя, конечно, может вызвать некоторое ослабление внимания при поверке и потому может увеличить предельную погрешность измерений.

Точность измерения величины P — мощности, учитываемой ваттметрами, — зависит от целого ряда факторов:

- 1) точности поддержания постоянства режима сети;
- 2) точности установки нуля корректором прибора;
- 3) точности отсчета показаний образцового ваттметра;
- 4) точности определения его поправок;
- 5) вариаций показаний образцового ваттметра;
- 6) точки шкалы прибора при отсчете;
- 7) числа образцовых ваттметров, одновременно применяемых при испытании или поверке счетчика.

Для устранения влияния колебания напряжения в сети испытательная сеть должна питаться генераторами, приводимыми в движение мотором постоянного тока, приключенным к отдельной батарее аккумуляторов. Если испытательная сеть нагружена другими приемниками энергии, то погрешности, возникающие вследствие непостоянства напряжения в сети, могут достигать величины, исчисляемой не только десятками процента, но даже и целыми процентами.

Таким образом можно утверждать, что поверка счетчиков по ОСТ 6225 на общей городской сети недопустима без применения специальных мер для стабилизации режима. Влияние второго, третьего и четвертого из перечисленных факторов зависит прежде всего от разрешающей силы зрения наблюдателя и от целого ряда конструктивных данных прибора — толщины стрелки, характера делений, толщины штрихов на шкале, расстояния от стрелки до шкалы, качества зеркала и т. д. Кроме того, внешние условия, например, освещение прибора, могут оказать влияние на точность установки нуля и заданного значения мощности. Влияние четвертого фактора — точности определения поправок, — кроме того, зависит от того, поверялся ли образцовый прибор на потенциометре или поверка была произведена методом сравнения с другими образцовыми приборами. В последнем случае, очевидно, погрешность определения величины P будет больше. Помимо возможных погрешностей поправок первичного образцового прибора, может оказать значительное влияние погрешность отсчета с интерполирующей значеший по его шкале.

Согласно материалам, опубликованным проф. Хельмар Бекстрем в книге «Ошибки наблюдателя»,¹ погрешность при отсчете по шкале достигает величины 0,1 деления и даже выше. Только при большом количестве повторных измерений эта величина значительно снижается, причем вносится систематическая погрешность, разная при различном

¹ Перевод с немецкого и-ва Стандартизация и рационализация, 1934.

значении отсчитываемой величины и зависящая от наблюдателя. Хотя эта личная ошибка и может быть определена опытом, но поскольку в метрологических учреждениях систематически она не определяется для отдельных наблюдателей, то ее можно отнести к случайным ошибкам измерения по стрелочному прибору. Влияние погрешностей, вносимых перечисленными факторами на погрешность величины P , как количественному теоретическому анализу, так и дифференцированному экспериментальному анализу не поддается.

Для оценки погрешности „наводки“, т. е. установки стрелки на определенное деление шкалы, был проделан опыт многократной проверки одной точки прибора по потенциометру постоянного тока. Для этой цели 200 раз регулировкой реостатом была установлена стрелка на деление 3,5 А электродинамического амперметра Weston Mod 370, причем наводка 100 раз была произведена увеличением тока (снизу) и 100 раз уменьшением тока (сверху). Действительное значение протекавшего через прибор тока каждый раз отсчитывалось на потенциометре фирмы Вольф. Отсчеты производились с точностью до 10^{-4} А и для статистического обследования были округлены до 0,001 А. Результаты наблюдений даны в таблице 3 и для наглядности представлены

Таблица 3

Отсчет по потенциометру, округленный до 0,001 А	3,496	3,497	3,498	3,499	3,500	3,501	3,502	3,503	3,504	3,505	3,506
Число отсчетов при увеличении тока	—	—	1	3	11	24	26	22	10	1	2
Число отсчетов при уменьшении тока	3	14	21	30	21	9	2	—	—	—	—

диаграммами на рис. 7. Строки 2—4 таблицы 3 и верхняя диаграмма относятся к наводке увеличением тока. Строчки 5—7 таблицы 3 и нижняя диаграмма относятся к случаям наводки уменьшением тока.

Из приведенных результатов следует, что распределение отклонений отдельных отсчетов от среднего весьма близко к нормальному. Среднее из отсчетов „снизу“ 3,50194 А и среднее из отсчетов „сверху“ 3,49887 А. Причиной этого расхождения являются вариации показаний прибора, вызванные главным образом трением в осях. Так как стрелка при наводке проводит положение равновесия по инерции и возвращается к нему аperiодически, отсчеты при наводке „снизу“ имеют в среднем большее значение, чем отсчеты „сверху“. Разность между этими значениями характеризует вариации данного прибора, которые, согласно приведенным материалам, равны

$$\frac{0,00307}{0,05} = 0,0614 \text{ деления,}$$

так как цена деления 0,05. Полученное значение вариаций данного прибора представляет интерес для оценки качества его. Этот прибор

Принимая за среднее значение 0,0014 А и выражая его в долях деления, получим

$$\alpha \approx \frac{0,0014}{0,05} = 0,028 \text{ деления.}$$

Предельная погрешность при наводке на определенное деление шкалы получается равной

$$\delta_1 = 0,028 \cdot 3 = 0,084 \text{ деления.}$$

Очевидно, что при установке нуля корректором на образцовом приборе при проверке последнего возможна такая же предельная погрешность, и следовательно его поправки будут определены с предельной погрешностью

$$\delta_2 = \sqrt{0,084^2 + 0,084^2} = 0,118 \text{ деления,}$$

и предельная погрешность показаний ваттметра при отсчете точки при проверке счетчика будет равна

$$\delta_3 = \sqrt{0,084^2 + 0,118^2} = 0,145 \text{ деления,}$$

так как установка на нуль корректором производилась на этом же приборе при его проверке и при проверке счетчика, а в расчет введена предельная погрешность.

Вероятность того, что погрешность наводки будет больше определенной таким образом, оказывается очень малой и ниже предела, установленного положением

$$\delta_4 = 3\sigma.$$

Итак, при стабильном режиме сети и исключении систематической погрешности от вариаций показаний образцового прибора, случайные погрешности, возникающие при наводке на определенное деление амперметра, не должны превосходить величины 0,145 делений, что составляет:

$$\frac{0,145 \cdot 100}{100} = 0,145\%$$

от номинального значения прибора.

Примем в дальнейшем это же значение предельной погрешности и для "наводки" точки на ваттметре, так как для учета погрешностей измерений характер штрихов стрелки и прочих конструктивных качеств однотипных электродинамических ваттметра и амперметра будут идентичны.

Таким образом для шкалы в 150 делений предельная ошибка отсчета будет выражаться величиной

$$\frac{0,145 \cdot 150}{100} = 0,218 \text{ делений.}$$

Абсолютная предельная погрешность отсчета мощности по одному ваттметру будет зависеть от предела измерений данного прибора или от цены делений.

Относительная предельная погрешность отсчета мощности, кроме того, будет зависеть от точки отсчета. Отсюда следует, что точность измерений коэффициента счетчика зависит от набора ваттметров, имеющихся в распоряжении поверителя.

Если отсчет по прибору обозначим через N , цену делений p , то абсолютная предельная погрешность отсчета мощности будет

$$\Delta P = 0,218 p W.$$

Если отсчет мощности производится путем суммирования показаний нескольких ваттметров, то абсолютная предельная погрешность значений $P = P_1 + P_2 + P_3$ может быть вычислена по выражению $\Delta P = \sqrt{(\Delta P_1)^2 + (\Delta P_2)^2 + (\Delta P_3)^2} = \sqrt{(0,218p)^2 \cdot 3} = 0,368 p$ при 3 ваттметрах, $0,308 p$ при 2 ваттметрах.

Относительная предельная погрешность отсчета мощности в процентах определяется выражениями:

при одном ваттметре

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{0,218p \cdot 100}{Np} = \frac{21,8}{N};$$

при двух ваттметрах:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{30,8}{N};$$

при трех ваттметрах:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{36,8}{N},$$

где N — сумма показаний ваттметров в делениях шкалы в 150 делений.

В таблице 4 приведены результаты расчета предельных погрешностей при определении коэффициентов счетчиков для наиболее ходовых пределов счетчиков.

Расчет сделан для комплекта образцовых ваттметров, применяемых в Лаборатории переменного тока ВНИИМ'а при испытаниях типов счетчиков. Эти приборы изготовлены фирмой Weston (модель 310) с пределами измерения 5—10 А, 150—300 В и 1—2 А, 150—300 В и допускают перегрузку током на 100% и напряжением на 50%.

Предельная относительная погрешность коэффициента счетчика была определена по выражению

$$\frac{\Delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \sum \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2},$$

где $\frac{\Delta k}{k}$ — предельная относительная погрешность коэффициента счетчика

в %; $\frac{\Delta I}{I}$ — предельная относительная погрешность значения I , принятая равной 0,375% на основании предыдущего, $\frac{\Delta P}{P}$ — предельная относительная погрешность отсчета по ваттметру в процентах.

Из данных последнего столбца таблицы 4 видно, что погрешность, с которой может быть определен коэффициент счетчика описанным методом, не превышает 0,51% для нагрузок не ниже 10% номинальной мощности. Таким образом этот метод можно считать безусловно

Таблица 4

Пределы применения светилка	Род тока	Нагрузка током в % от номинальной		Предел применения ваттметра		Цены деления в В				Точка отсчета по ваттметру				Учитываемая ватт-метром мощность в В	Абсолютная предельная погрешность мощности в В	Относительная предельная погрешность мощности в %	Пределная погрешность определения коэффициента светилка в %
		Сила F	Ток в А	Напряжение в В	Цены деления в В				Точка отсчета по ваттметру								
					10	150	Первому	Второму	Третьему	Сумма	Первому	Второму	Третьему				
5 А 127 В	Одnofазный	1,0	125	10	150	10	79	—	—	79	790	2,18	0,277	0,47			
			100	5	150	5	127	—	—	127	635	1,19	0,172	0,41			
			50	2	300	4	79	—	—	79	316	0,87	0,277	0,47			
			10	1		1	64	—	—	64	64	0,22	0,341	0,51			
			5	1		1	32	—	—	32	32	0,22	0,682	0,78			
		0,5	125	5	150	5	79	—	—	79	395	1,19	0,277	0,47			
			100	5		5	64	—	—	64	320	1,19	0,341	0,51			
			50	2		2	79	—	—	79	158	0,44	0,277	0,47			
			20	1		1	64	—	—	64	64	0,22	0,341	0,51			
			10	1		1	32	—	—	32	32	0,22	0,682	0,78			
		3×5 А 220 В	Трехфазный трехпроводной системы	1,0	125	5	300	10	119	119	—	238	2380	3,08	0,129	0,40	
					100	5		10	95	95	—	190	1900	3,08	0,162	0,41	
					50	2		4	119	119	—	238	952	1,23	0,129	0,40	
					10	1		1	95	95	—	190	190	0,31	0,162	0,41	
5	1				1	48		48	—	96	96	0,31	0,320	0,49			
0,5	125			5	300	10	0	119	—	119	1190	3,08	0,259	0,46			
	100			5		10	0	95	—	95	950	3,08	0,324	0,50			
	50			5		4	0	119	—	119	476	1,23	0,259	0,46			
	20			1		2	0	95	—	95	190	0,62	0,324	0,50			
	10			1		1	0	95	—	95	95	0,31	0,324	0,50			
3×5 А 220 В	Трехфазный четырехпроводной системы			1,0	125	5	300	10	79	79	79	237	2370	3,68	0,155	0,41	
					100	5	150	5	127	127	127	381	1905	1,84	0,096	0,40	
					50	2	300	4	79	79	79	237	948	1,47	0,155	0,41	
					10	1		1	64	64	64	192	192	0,37	0,192	0,42	
		5	1			1	32	32	32	96	96	0,37	0,383	0,54			
		0,5	125	5	150	5	79	79	79	237	1185	1,84	0,155	0,41			
			100	5		5	64	64	64	192	960	1,84	0,192	0,48			
			50	2		2	79	79	79	237	474	0,74	0,155	0,41			
			20	1		1	64	64	64	192	192	0,37	0,192	0,42			
			10	1		1	32	32	32	96	96	0,37	0,383	0,51			

надежным для проверки счетчиков II класса точности. Для проверки счетчиков I-класса надлежит повысить точность измерений.

Точность измерения времени может быть повышена следующим путем. Все наблюдения, при которых разность между наибольшим и наименьшим показаниями секундомеров превышает 0,4 сек, исключаются из расчета и заменяются новыми. Таким образом, те наблюдения, при которых за время пуска или остановки секундомеров проходила 2-я или 3-я цифра счетного механизма, считаются „браком“ и в расчет не вводятся. Это вполне целесообразно, так как если замедление вращения диска, вызванное прохождением лишней цифры (2-й и 3-й) счетного механизма, произойдет за период между пуском последнего секундомера и остановкой первого — отклонение значения коэффициента счетчика послужит материалом для определения значения вариаций, нормированных § 30 ОСТ 6225. Замедление же диска при пуске или остановке секундомеров, ухудшая точность определения времени t , даст неполный эффект для суждения о вариациях.

Расчет абсолютной предельной погрешности результата измерений времени t по четырем секундомерам на основании материалов 1—10-ой строк таблицы 1 приводит к следующим результатам:

$$S = 0,0616 \text{ сек}$$

$$\delta_t = 0,185 \text{ сек.}$$

Если выбрать число оборотов диска n таким, чтобы t было около 2 мин, то предельная относительная погрешность получит значение:

$$\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_t = \frac{0,185}{120} = 0,153\%$$

При $t = 3$ мин это значение будет 0,1 сек.

Последний результат можно получать также при пользовании хронографом вместо секундомеров.

Наиболее эффективным для повышения точности определения мощности будет применение ваттметров с крутильной головкой типа Drysdale, позволяющих отсчитывать мощность с предельной погрешностью, не превышающей 0,1% для всех точек, требуемых по ОСТ 6225.

При отсутствии таких ваттметров надо считать весьма желательным наличие обычных ваттметров класса 0,2 с пределом 2,5 А и безусловно необходимым — ваттметров с пределом 0,5 А. Только при этом условии можно гарантировать, что погрешность определения коэффициента счетчика для нагрузок, равных 5% от номинальной мощности, не превысит 0,20—0,25%.

При повторных проверках одного и того же счетчика при одинаковом режиме могут быть получены различные значения для коэффициента счетчика по следующим причинам:

1) диск счетчика вращается неравномерно и

2) все измерения при проверке дают результаты с некоторой случайной погрешностью, предельное значение которой установлено выше.

Допустим, что поверяется счетчик, диск которого вращается идеально равномерно. Очевидно, что в этом случае расхождение между значениями коэффициента, полученными в результате опыта, будут зависеть

от метода поверки, качества применяемых приборов и от того, те же или разные приборы применялись при повторной поверке.

Если поверка повторяется, не устанавливая точку вновь, то расхождения между значениями коэффициентов будут зависеть только от погрешности отсчета промежутка времени оборотов диска, учтенных при поверке.

Согласно изложенному выше, при отсчете по четырем секундомерам абсолютная предельная погрешность результата отсчета t будет $0,185 \text{ сек.}$ Если $t = 1 \text{ мин.}$, то относительная предельная погрешность измерения

этой величины $\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_t = 0,31\%$. Если $t = 3 \text{ мин.}$, то $\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_t = 0,10\%$.

Расхождение между значениями коэффициента в этих случаях не должно превышать

$$2\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_t = 0,62\% \quad \text{и} \quad 2\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_t = 0,20\%.$$

Если при повторной поверке с одним и тем же ваттметром каждый раз устанавливается точка только „снизу“ или только „сверху“, то расхождение между значениями коэффициента будет определяться выражением:

$$\delta_1 = 2 \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_t^2 + \left(\frac{\Delta N}{N} 100\right)^2},$$

где $\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_t$ — относительная предельная погрешность отсчета времени в процентах; ΔN — предельная абсолютная погрешность „наводки“ в делениях шкалы, N — точка отсчета и $\frac{\Delta N}{N} \cdot 100$ — предельная относительная погрешность „наводки“ в % от измеряемого значения, но при этом вариация ваттметра окажется не исключенной. Для случая поверки счетчика в 5 А 127 В при нормальной нагрузке предельное расхождение значения коэффициентов получается равным

$$\delta_1 = 2 \sqrt{0,31^2 + \frac{0,081 \cdot 150 \cdot 100 \cdot 2}{100 \cdot 127}} = 0,66\% \text{ при } t = 1 \text{ мин} \text{ и } \delta_1 = 0,28\% \text{ при } t = 3 \text{ мин.}$$

Если принять во внимание „среднее значение вариаций ваттметра“ и считать его равным величине, определенной по материалам таблицы 3,

$$\delta_w = \frac{0,06161 \cdot 150 \cdot 100}{100 \cdot 127} = 0,0725\% \text{ или округленно } 0,07\% \text{ измеряемой}$$

мощности, то расхождение между значениями коэффициентов, полученными при наводке „сверху“ и наводке „снизу“, может достигать значения $\delta = \delta_1 + \delta_w = 0,73\%$ при $t = 1 \text{ мин}$ и $\delta = 0,35\%$ при $t = 3 \text{ мин}$.

При повторной поверке счетчика тем же методом, но другими ваттметрами, или теми же ваттметрами после поверки последних и новой установки нуля, расхождение между полученными значениями коэффициентов может достигать удвоенного значения относительных предельных погрешностей, указанных в последнем столбце таблицы 4. Расхождение между значениями коэффициентов, полученными при

„наводке точки“ первый раз „снизу“, а второй „сверху“, может быть еще больше на величину „среднего значения вариаций прибора“, выраженной в процентах от измеряемой мощности.

Итак, если принять термин „вариации погрешностей счетчика“, согласно § 27 ОСТ 7656, и допуски § 30 ОСТ 6225 отнести к действительному значению погрешности счетчика и, следовательно, к действительному значению коэффициента, но не к значениям, полученным из опыта, то расхождение последних, по мнению автора, характеризуется, главным образом, сочетания случайных погрешностей при измерении. Даже при идеально равномерном вращении диска расхождение результатов поверки может достигать пределов, установленных § 30 ОСТ 6225, т. е. 1% при поверке счетчиков II класса методом, описанным выше, и 0,5% при поверке счетчиков I класса точности методом, соответствующим этому классу.

Таким образом, при вариациях действительного значения коэффициента счетчика в пределах, установленных ОСТ'ом, результаты поверки соответственными методами могут дать расхождение до 2% для счетчиков II класса и 1% для счетчиков I класса. Но при таком расхождении действительных значений коэффициентов результаты двукратной поверки могут и не дать никакого расхождения. Например, при первой поверке действительное значение коэффициента счетчика было 1,000, при второй 1,010, а результат поверки дал в первом случае значение $1 \pm 0,005$, т. е. 1,005 и во втором случае 1,010—0,005, т. е. 1,005. Хотя такое совпадение мало вероятно, но принципиально возможно. Если же расхождение между значениями коэффициентов, найденными опытом, заключается в пределах от 1 до 2%, то одинаково вероятно как то, что поверяемый счетчик II класса удовлетворяет требованиям § 30 ОСТ 6225, так и то, что он не удовлетворяет этим требованиям. Только если расхождение превышает 2%, можно утверждать, что вариации действительных значений коэффициентов данного счетчика безусловно превышают допуски, установленные ОСТ'ом.

Таким образом казалось бы, если расхождение между найденными из опыта значениями коэффициентов не превышает удвоенных допусков § 30 ОСТ 6225, то невозможно судить о том, удовлетворяет ли или не удовлетворяет данный счетчик требованиям этого параграфа ОСТ'а.

Для определения вариаций коэффициента счетчика (а следовательно и вариаций его погрешности) необходимо производить специальное измерение, практически возможное только при проверке в лаборатории. Определение „вариаций погрешностей“, как полагает автор, могло бы быть проведено следующим путем. Коэффициент счетчика определяется дважды при нагрузке, равной 10% от номинальной. Первый раз при передвижении только одной цифры счетного механизма и второй раз при передвижении трех цифр. Второе определение следует за первым без промежуточного изменения или исключения тока, т. е. без повторной установки точки. Счет оборотов производится в течение 3 мин. Измерение времени производится четырьмя секундомерами. Если расхождение между значениями коэффициента не превышает допусков § 30 ОСТ 6225, то вариации погрешностей во всяком случае не превышают 0,6% для счетчиков I класса и 1,1% для

для счетчиков II класса, так как предельная относительная погрешность отсчета времени будет равна $0,1\%$.

При проверке счетчиков при помощи образцового (контрольного) счетчика, технический процесс проверки сводится к счету оборотов диска поверяемого счетчика к пуску образцового счетчика с началом счета и остановкой при конце. Коэффициент поверяемого счетчика в этом случае определяется выражением:

$$k = \frac{nc}{Nc_n}$$

где n — показание образцового счетчика, т. е. число оборотов его диска за время наблюдений; c — число ваттсекунд, соответствующее одному обороту диска образцового счетчика; N — наблюдаемое число оборотов поверяемого счетчика; c_n — число ваттсекунд, номинально соответствующее одному обороту диска поверяемого счетчика. Это число определяется расчетом из переводного множителя, указанного на счетчике.

Погрешность результатов проверки будет зависеть от:

1) погрешности, с которой известна величина c , т. е. погрешности при определении коэффициента образцового счетчика при проверке последнего. Эта величина, как было выяснено выше, имеет значение $0,51\%$ для счетчиков II класса точности и $0,20-0,25\%$ для счетчиков I класса при методах проверки, соответствующих требованиям, предъявляемым к этому классу счетчиков;

2) погрешности от несовпадения моментов пуска и остановки образцового счетчика с моментами начала и конца счета оборотов диска поверяемого счетчика или погрешности отношения $\frac{n}{N}$. Эта погрешность будет тождественна с погрешностью определения величины t при пользовании одним секундомером, так как пуск и остановка образцового счетчика производится нажатием кнопки, включающей напряжение, т. е. аналогично пуску и остановке одного секундомера.

Как было выяснено выше, абсолютная предельная погрешность определения времени t равна $0,42$ сек. Отсюда следует, что относительная предельная погрешность величины $\frac{n}{N}$ будет равна

$$\frac{\Delta\left(\frac{n}{N}\right)}{\frac{n}{N}} = \frac{0,42}{60} = 0,70\%$$

при включении образцового счетчика на 1 мин и $0,23\%$ на 3 мин;

3) погрешности отсчета показаний образцового счетчика. Эта погрешность практически будет исчезающе малой для не очень малых нагрузок счетчика, так как отсчет по циферблату образцового счетчика производится с точностью до $0,01$ оборота и даже выше.

В дальнейших расчетах эту погрешность мы принимать во внимание не будем;

4) погрешности вследствие вариаций коэффициента образцового счетчика.

Влияние этой погрешности на точность определения коэффициента счетчика может быть весьма значительным.

Очевидно, образцовый счетчик должен быть счетчиком I класса точности, так как в противном случае погрешность определения коэффициента счетчика безусловно превысила бы 0,5% и при помощи образцового счетчика было бы невозможно установить, удовлетворяет ли поверяемый счетчик требованиям ОСТ 6225 даже для счетчиков II класса точности.

При проверке счетчика II класса точности предельная относительная погрешность найденного значения коэффициента счетчика может быть определена из выражения:

$$\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_t = \sqrt{\left(\frac{\Delta\left(\frac{n}{N}\right)}{\frac{n}{N}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 + \frac{\delta}{2}},$$

где $\left(\frac{\Delta\left(\frac{n}{N}\right)}{\frac{n}{N}}\right)$ — относительная предельная погрешность (в %) отношения чисел оборотов дисков обоих счетчиков, равное относительной предельной погрешности отсчета времени, в течение которого образцовый счетчик был в действии; $\frac{\Delta c}{c}$ — относительная предельная погрешность значения коэффициента образцового счетчика в ‰; δ — предельное значение вариаций коэффициента образцового счетчика в ‰.

Если образцовый счетчик был в действии в течение 3 мин, то, вводя в расчет предельные значения для $\frac{\Delta c}{c}$ и δ , согласно ОСТ 6225, получим следующее значение для предельной погрешности определения коэффициента счетчика II класса при помощи образцового счетчика I класса

$$\frac{\Delta k}{k} = \sqrt{0,23^2 + 0,20^2} + 0,25\text{‰} = 0,56\text{‰}.$$

Если увеличить срок действия образцового счетчика до 5 мин, то предельную относительную погрешность можно уменьшить до 0,5‰, т. е. до предельного значения погрешности, равного той, которую дает измерение при помощи ваттметра и четырех секундомеров.

Если трение, создаваемое счетным механизмом образцового счетчика, не изменяется при работе последнего и, следовательно, «вариации погрешностей счетчика» будут практически отсутствовать, то относительная предельная погрешность отношения $\frac{n}{N}$ при проверке счетчика будет: при действии образцового счетчика в течение 1 мин — 0,70‰, в 2 мин — 0,35‰ и 3 мин — 0,23‰ и относительная погрешность результата проверки соответственно — 0,73, 0,40 и 0,31‰.

Таким образом срок действия образцового счетчика 2 мин является вполне достаточным для проверки при определенной нагрузке счетчика II класса точности по ОСТ 6225.

При этом конечно, измерение должно быть произведено при переходе только одной цифры счетного механизма.

Для определения вариаций погрешностей счетчика при помощи образцового счетчика, очевидно, можно поступить так же, как и при проверке счетчика ваттметрами, но при этом необходимо, чтобы у образцового счетчика вариации погрешностей отсутствовали.

Все упомянутые заключения будут справедливы только при стабильном режиме сети. Если же это условие не выполнено, как это бывает при проверке на месте установки, то точность проверки счетчика вообще снижается и проверка при помощи образцового счетчика дает более надежные результаты по сравнению с проверкой ваттметрами. При наличии в сети значительных колебаний напряжения и мощности и особенно при кратковременных „пиках“, результаты проверки ваттметрами надо считать вообще только ориентировочными.

Проверка на месте установки в трехфазной сети на высоком напряжении обычно является комбинированной. Счетчик проверяется одновременно ваттметрами и образцовым счетчиком. В проверке принимают участие 2 наблюдателя: один, находящийся перед проверяемым счетчиком, ведет счет оборотов его диска, подает сигнал включением и выключением сигнальной лампы при начале и конце счета и включает и выключает секундомер. Второй наблюдатель, находящийся обычно за щитом у места включения измерительных трансформаторов, по этому сигналу включает и выключает образцовый счетчик и второй (для контроля) секундомер и ведет непрерывное наблюдение и запись показаний ваттметров. Кроме того, отмечается сила тока и напряжение в сети. Эти данные необходимы не только для вычисления коэффициента счетчика по ваттметрам, но и для определения режима, т. е. мощности и угла сдвига между напряжением и током в сети. Результаты проверки при помощи образцового счетчика контролируются результатами, полученными при помощи ваттметров и секундомера.

Каждое наблюдение обычно длится около 1 мин. Измерение на каждой нагрузке производится не менее четырех раз.

На результат каждого измерения оказывают влияние дополнительные источники случайных погрешностей:

1) погрешность возникающая от несовпадения моментов начала или конца счета оборотов проверяемого счетчика и подачи сигнала об этом первым наблюдателем и восприятием этого сигнала и пуском или остановкой образцового счетчика и секундомера вторым наблюдателем;

2) вызванная колебаниями нагрузки в сети дополнительная погрешность вводимого в расчет значения c — числа ватт-секунд, соответствующих одному диску образцового счетчика.

Как показывает опыт, влияние погрешности, вызванной первым источником, на результат измерений вообще не велико, но не исчезающее мало.

Влияние погрешности, вызванной вторым из упомянутых источников, в значительной мере зависит от формы кривой погрешностей образцового счетчика и характера колебаний режима в сети, так как в расчет вводится значение c для некоторого среднего режима, в то время как образцовый счетчик работает при различных режимах.

Сравнительно небольшой опыт Лаборатории переменного тока

ВНИИМ'а в отношении проверок на местах установок показывает, что при четырехкратной проверке трехфазного счетчика при одном и том же режиме при помощи образцового счетчика фирмы Вестингауз при колебаниях мощности в сети порядка $\pm 20\%$ от средней можно гарантировать, что погрешность результата проверки, как среднего арифметического из результатов четырех наблюдений, не превышает 1% . Если колебания режима достигают больших значений, то такую же точность проверки можно получить соответственным увеличением числа повторных измерений. При этом результат проверки, конечно, дает среднее значение погрешности счетчика для нагрузок, в пределах которых имели место колебания мощности в сети за время проверки.

Если же требуется определить коэффициенты счетчика на месте установки с относительной погрешностью, не превышающей $0,5\%$, то число повторных измерений, как это следует из теории ошибок, следует произвести в 4 раза больше и за наименее вероятнейшее значение коэффициента следует принять среднее арифметическое из всех результатов повторных измерений.

При проверке на низком напряжении однофазных счетчиков II класса точности при помощи образцового счетчика условия проверки будут практически аналогичными лабораторным. Относительные предельные погрешности результатов проверки при таких условиях рассмотрены выше.

Надежное определение вариаций погрешностей счетчика на месте установки представляет весьма значительные трудности и осуществимо только при наличии возможности сравнить погрешности счетчика или его коэффициенты в условиях перехода одной из трех цифр счетного механизма при нагрузке порядка 10% от номинальной.

Из изложенного выше вытекает, что требуемая ОСТ 6225 точность проверки счетчиков может быть осуществлена в лабораторных условиях применением методов, описанных выше.

Та же точность для проверки счетчиков на местах установки может быть достигнута увеличением числа повторных измерений; но, так как этот прием усложнит и удлинит процесс проверки, то автор полагает, что было бы целесообразно для счетчиков II класса точности, проверяемых на местах установки, повысить допуски на точность измерений до 1% , не нормируя при этом вариаций погрешностей.

Допуски для погрешности образцовых счетчиков, по мнению автора, должны быть равны допускам, установленным для счетчиков I класса точности, как это и принято в правилах ГУМВ № 167 «Об устройстве и проверке счетчиков образцовых индукционных», вариации же погрешности для образцовых счетчиков вообще не должны быть допущены.

A. A. Ceculin

L'INFLUENCE DE L'ERREUR DES MESURES SUR LA PRÉCISION DE LA VÉRIFICATION D'UN COMPTEUR D'INDUCTION

Résumé

L'élaboration statistique de 4000 lectures de chronoscope lors de l'essai des types de compteurs au Laboratoire du courant alternatif de l'Institut

de Métrologie de l'USSR a donné pour l'erreur moyenne quadratique absolue d'une mesure avec 4 chronoscopes la valeur de $\sigma = 0,07$ sec., et pour l'erreur absolue maximum 0,21 sec., en admettant cette dernière être égale à la triple valeur de σ . Pour déterminer l'exactitude de l'application de l'aiguille sur la division donnée de l'échelle d'un appareil à aiguille on avait fait à 200 reprises la vérification d'un point d'un ampèremètre dont 100 fois par l'augmentation et 100 fois par la diminution de l'intensité du courant. Les résultats sont donnés sur les tableaux 3 et la fig. 7. La fig. 7 montre clairement la valeur de la variation moyenne de l'ampèremètre. Les résultats du travail ont permis de déterminer les erreurs maximum des mesures des coefficients du compteur. Les valeurs obtenues sont données dans la dernière colonne du tableau 4 pour quelques charges des compteurs aux limites les plus usitées. Les résultats du travail montrent que la détermination des variations des erreurs du compteur exige des mesures spéciales avec comparaison des coefficients du compteur lors du passage de trois chiffres et d'un chiffre du mécanisme compteur.

Dans le cas où la charge et l'intensité dans le réseau électrique sont variables la précision de la vérification des compteurs à l'aide d'un compteur de référence est plus grande qu'à l'aide des wattmètres et des chronoscopes. Mais si le régime du réseau est constant la vérification à l'aide d'un compteur de référence donne des résultats équivalents ou quelque peu moins bons. Le compteur de référence doit être un compteur de première classe de précision et ne doit pas avoir de variations des erreurs.



Н. А. Маренин

СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ЧАСТОТ

Введение

Измерение одного из параметров переменных величин — частоты — не относится к электрическим измерениям, поскольку размерность $f = T^{-1}$ и следовательно дело сводится к измерению времени, хотя при этом обычно и пользуются электрическими схемами. В настоящей статье идет речь не об обычных измерениях технической частоты, применяемой в промышленности, где для этой цели пользуются различного рода частотомерами, а об измерениях, к которым предъявляются требования предельной метрологической точности. С необходимостью такого рода точного измерения частоты Лаборатория переменного тока встретила главным образом при работах с потенциометрами переменного тока, так как здесь точное знание основной частоты почти всегда необходимо. Кроме того, при исследовании различного рода частотомеров и их поверке также, конечно, необходимо знать частоту с большей точностью, чем дает исследуемый частотомер. Таким образом Лаборатория переменного тока необходимо

было выработать метод измерения частоты с возможно большой точностью, удовлетворяющий, кроме того, еще следующим условиям: 1) процесс измерения должен быть максимально прост, не занимать много времени, 2) результат измерения должен быть получен непосредственно после измерения, и 3) метод должен дать возможность установить и поддерживать заданную наперед частоту, все время ее контролируя. Последние условия исключают возможность применить такие методы, как, например, осциллографирование данной переменной величины с параллельной отметкой времени, запись на хронографе при помощи синхронного мотора и т. д., так как, хотя точность измерения и может быть весьма велика, но на производство измерения и на обработку требуется масса времени, установка же наперед заданной частоты совершенно невозможна. Кроме того при этих методах необходима постоянная электрическая связь с Лабораторией точного времени. Дело упрощается, если иметь свой эталон времени (или

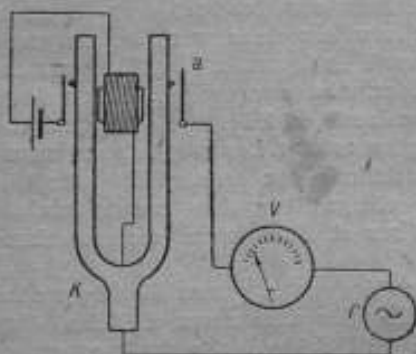


Рис. 1.

частоты), например, камертон, и воспользоваться методом биения для сравнения эталонной частоты и измеряемой. Так например, возможно воспользоваться для этой цели простой установкой, изображенной схематически на рис. 1. Камертон K с электрическим возбуждением замыкает при каждом своем колебании контактом a цепь напряжения

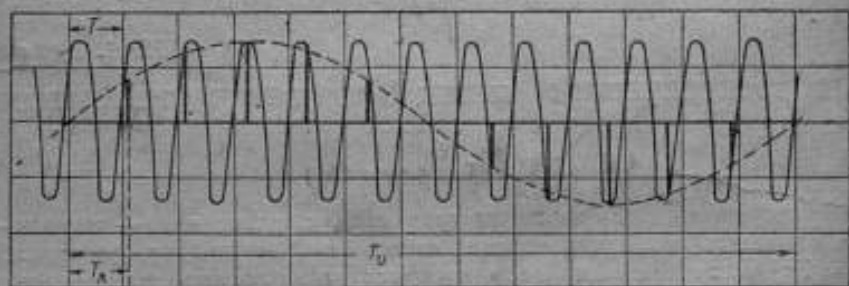


Рис. 2.

испытываемой частоты $f = \frac{1}{T}$, в которую включен магнитоэлектрический вольтметр со шкалой, имеющей нуль посредине. При несовпадении частоты колебания камертона f_k и испытываемой f , возникают биения, и стрелка вольтметра будет колебаться с частотой $f_0 = \pm(f_k - f)$ (рис. 2). Если эта частота f_0 лежит в пределах наблюдения и счета по секундомеру непосредственно глазом, то представляется возможность вычислить и искомую частоту f . Однако, как легко видеть, этим способом возможно производить измерение частот только в узких пределах, так как для удобства счета f_0 должно быть порядка не бо

лее 2—3 Hz, и, следовательно, необходимо иметь большой набор камертонов на разные частоты f_k . Кроме того, чрезвычайно трудно определить, что больше, f_k или f , вследствие чего легко впасть в ошибку.

От всех этих недостатков свободен стробоскопический метод сравнения частоты эталонного камертона f_k с испытуемой f , который и был применен Лабораторией переменного тока.

Стробоскопический метод

Стробоскопическая установка схематически представлена на рис. 3. Здесь K — камертон с эталонной частотой f_k и с электрическим возбуждением от батареи B_1 при помощи электромагнита M и прерыва-

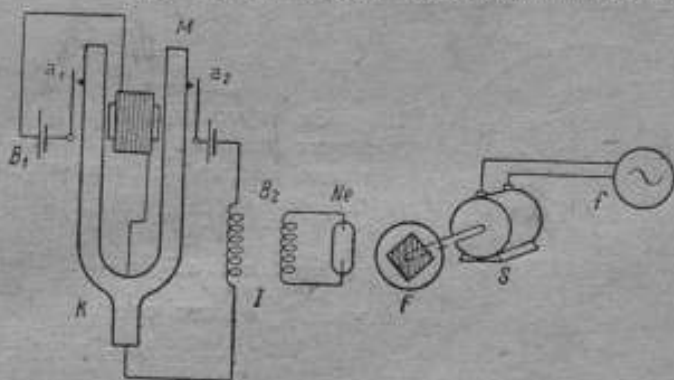


Рис. 3.

теля a_1 ; второй прерыватель a_2 периодически замыкает и размыкает цепь батареи B_2 и первичной обмотки небольшого индуктора I , вторичная обмотка которого питает своими импульсами газосветную неоновую лампу Ne . Таким образом получаются периодические вспышки неоновой лампы с частотой камертона f_k , причем продолжительность каждой вспышки чрезвычайно мала, примерно порядка 10^{-6} сек (рис. 4), благодаря соответственной кратковременности импульса вторичного напряжения при размыкании контакта a_2 и безинерционности неоновой лампы. Этот прерывистый свет освещает диск с нанесенной на нем какой-либо правильной многоугольной фигурой F ; диск укреплен на оси небольшого синхронного двигателя S , питаемого током испытуемой частоты f . Таким образом фигура F вращается с некоторой скоростью n об/сек оси двигателя, зависящей только от числа полюсов $2p$ двигателя и частоты f испытуемого тока. При рассмотрении этой фигуры

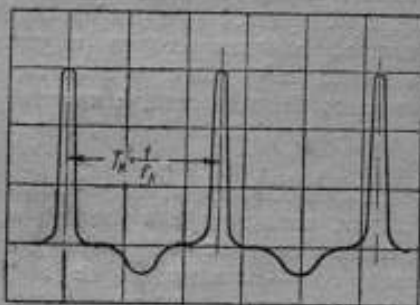


Рис. 4.

в прерывистом свете неоновой лампы наблюдается стробоскопический эффект, заключающийся в том, что фигура кажется вращающейся с гораздо меньшей скоростью, причем направление вращения может либо совпадать с действительным направлением вращения диска, либо быть противоположного направления; в частном случае фигура может казаться совершенно неподвижной. Причина этого явления лежит, как известно, в свойстве глаза сохранять некоторое время полученное впечатление.

Пусть фигура F представляет собой правильный m -угольник; угловая скорость вращения оси мотора, а, следовательно, и фигуры, $\omega = 2\pi n$, но n связано с частотой f тока, питающего мотор, и с числом полюсов $2p$ мотора соотношением $n = \frac{f}{p}$ об/сек, следовательно

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}$$

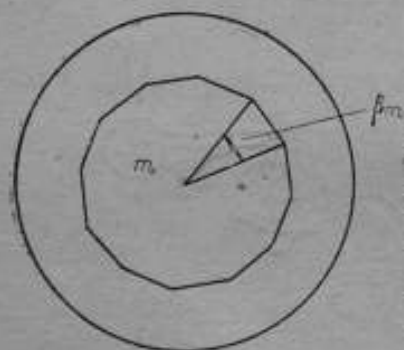


рис. 5

За промежуток времени между двумя вспышками лампы, т. е. за время одного колебания камертона

$T_k = \frac{1}{f_k}$, диск с фигурой повернется на угол $\alpha = \omega T_k = \frac{2\pi f}{p f_k}$. Центральный

угол β_m между соседними вершинами фигуры $\beta_m = \frac{2\pi}{m}$ (рис. 5). Как было уже

сказано, продолжительность вспышки весьма невелика, поэтому за время отдельной вспышки диск практически поворачивается на такой малый

угол, что глазу кажется неподвижным. Легко видеть, что при периодическом освещении вращающегося диска с правильной фигурой он тоже покажется неподвижным, если за время между вспышками фигура повернется как раз на свой центральный угол; в виду полнотойждественности сторон и углов глаз не замечает этой подмены и видит фигуру как не меняющую места. Таким образом фигура покажется неподвижной, если выполнено условие:

$$\alpha = \beta_m \quad (1)$$

Такая же кажущаяся неподвижность будет наблюдаться и в том случае, если за время между вспышками фигура поворачивается на двойной центральный угол β_m , на тройной и вообще на целый кратный угол — глаз также не заметит такой подмены. Следовательно условие кажущейся неподвижности фигуры принимает такой вид:

$$\alpha = \beta_m z, \quad (2)$$

где z , согласно сказанному, — любое целое число.

Можно еще приблизиться к действительно наблюдаемому эффекту, если положить, что $z = \frac{a}{b}$ — некоторая простая несократимая дробь, где a и b — целые числа, причем b обычно не более трех. Такая за-

мена равносильна предположению, что за время между вспышками фигура поворачивается не на целый центральный угол (или кратные углы), а на кратные целые полууглов или третьей части углов β_m . В таком случае глаз увидит не одну неподвижную фигуру, а две или три, смещенные по отношению друг к другу на половину или треть центрального угла. Если, например, фигура — квадрат и $z = \frac{1}{2}$, то при условии $\alpha = \beta_m z$ квадрат поворачивается на половину центрального угла, т. е. на $\frac{\pi}{4}$, и наблюдатель будет видеть два неподвижных квадрата, как из рис. 6. Таким образом знаменатель дроби $\frac{a}{b} = z$

определяет вид получаемой стробоскопической фигуры: при $b = 1$ имеем одиночную фигуру, при $b = 2$ — двойную, при $b = 3$ — тройную. Более чем на три стробоскопические фигуры обычно устойчиво не распадаются, причем для фигур с очень большим числом сторон (более 7) кратность распада не может быть более двух.

Как было указано, для кажущейся неподвижности фигуры должно быть выполнено условие (2), т. е. $\alpha - \beta_m z = 0$.

Легко видеть, что невыполнение этого условия ведет к кажущемуся вращению фигуры с некоторой угловой скоростью ω_m , которая может быть найдена из следующих соображений: разность $\alpha - \beta_m z$ представляет кажущееся угловое перемещение какой-либо вершины фигуры по отношению к самой себе за промежуток времени $T_k = \frac{1}{f_k}$ между двумя вспышками лампы, откуда искомая угловая скорость, равная кажущемуся угловому перемещению какой-либо вершины за 1 сек, будет в f_k раз более, т. е.

$$\omega_m = (\alpha - \beta_m z) \cdot f_k \quad (3)$$

или, подставляя значения α и β_m

$$\pm \omega_m = \left(\frac{2\pi f}{p f_k} - \frac{2\pi z}{m} \right) f_k = 2\pi \left(\frac{f}{p} - \frac{f_k z}{m} \right) \quad (4)$$

Как видно, стробоскопическая кажущаяся угловая скорость вращения фигуры может быть положительной или отрицательной, смотря по знаку разности $\frac{f}{p} - \frac{f_k z}{m}$; положительный знак соответствует направлению стробоскопического вращения в ту же сторону, куда вращается ось двигателя, отрицательный — в противоположную сторону. Удобнее считать кажущееся число оборотов фигуры за какой-либо промежуток времени и потом найти число n_m об/сек. Формула (4) дает для n_m

$$\pm n_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = \left(\frac{f}{p} - \frac{f_k z}{m} \right) \text{ об/сек.} \quad (5)$$

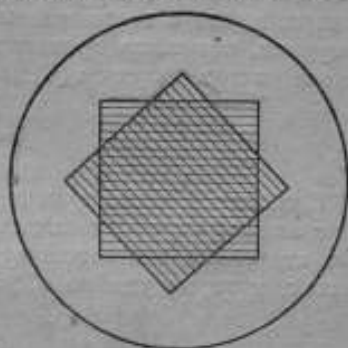


Рис. 6.

откуда, зная из наблюдения n_m , можно найти подлежащую измерению частоту f :

$$f = \left(\pm n_m + \frac{f_k z}{m} \right) p. \quad (6)$$

Знак для n_m берется согласно с указанным выше. Удобные для наблюдения и счета кажущиеся числа оборотов в секунду должны быть не более чем $0,2$ об/сек, т. е. стробоскопическая фигура должна делать один оборот за время не менее 4 сек, так как иначе глазом трудно следить за этим движением. Легко видеть, что в этом отношении метод предоставляет широкие возможности; выбрав соответствующие для данной частоты f числа сторон многоугольника и имея только один камертон с эталонной частотой f_k и набор дисков с разными фигурами, возможно производить измерение на очень большом диапазоне частот. Формула (6) может быть переписана следующим образом:

$$f = \frac{f_k z p}{m} \pm n_m p. \quad (7)$$

При данной частоте камертона f_k и числе полюсов мотора $2p$, неподвижной стробоскопической картине, т. е. $n_m = 0$, каждой фигуре с m сторонами соответствует некоторое число вполне определенных частот, которые удобно обозначить через f_{0m} :

$$f_{0m} = \frac{f_k z p}{m}, \quad (8)$$

где z , если отбросить неудобнонаблюдаемые двойные и тройные фигуры, как сказано, могут быть только целыми числами (1, 2, 3 и т. д.). Эти частоты для каждой фигуры могут быть заранее подсчитаны и помещены в сводную таблицу, как это будет сделано далее. В таком случае:

$$f = f_{0m} \pm n_m p. \quad (9)$$

Требование, чтобы стробоскопические скорости вращения n_m не превосходили $\pm 0,2$ об/сек будет выполнено, если набор фигур таков, что между любыми соседними частотами f_{0m} имеется разница Δf_{0m} , не большая, чем $2 \times 0,2 p$. Пользуясь фигурами с большим числом сторон — до 23 и более, легко удовлетворить этому условию при любых f_k и p .

Таким образом для измерения данной частоты достаточно подобрать такую фигуру, которая давала бы на стробоскопической установке достаточно медленное кажущееся вращение, удобное для его счета оборотов с одновременным измерением времени при помощи, например, секундомера, чтобы получить все данные для определения искомой частоты по формуле (9). Вопрос о том, которую из частот f_{0m} следует взять в данном случае, т. е. какое z имеет место, решается либо по ориентировочным измерениям грубым частотомером, либо из сопоставления наблюдения стробоскопических картин других фигур с другими числами сторон, для чего удобно иметь на одном диске набор таких фигур.

Стробоскопическая установка Лаборатории переменного тока

Установка Лаборатории переменного тока состоит из камертона с номинальной частотой $f_{kn} = 25$ Hz, синхронного фониического мотора при числе полюсов $2p = 20$ и неоновой лампы с соответствующим индуктором. Для этих данных формулы (9) и (8) принимают вид:

$$f = f_{om} \pm pn_m = f_{om} \pm 10n_m \quad (10)$$

$$f_{om} = \frac{z}{m} p f_{kn} \frac{f_k}{f_{kn}} = \frac{z}{m} 250 \cdot \frac{f_k}{25} = f'_{om} \frac{f_k}{25}. \quad (11)$$

Здесь отношение $\frac{f_k}{f_{kn}} = \frac{f_k}{25} = h$ есть поправочный множитель на неточность настройки камертона на номинальную частоту 25 Hz, а f'_{om} — табличные частоты неподвижных стробоскопических картин, вычисленные для номинальной частоты 25 Hz. На практике удобнее считать не число оборотов стробоскопической фигуры, а число прохождений мимо какой-либо неподвижной метки вершин данной фигуры, так как при этом глаз утомляется гораздо меньше, а точность отсчета значительно повышается. Если за время t секунд прошло N вершин фигуры с m сторонами, то число оборотов в секунду $n_m = \frac{N}{mt}$, и формула (10) принимает следующий вид:

$$f = f'_{om} h \pm \frac{10N}{mt}, \quad (12)$$

где h — поправочный множитель камертона

$$h = \frac{f_k}{25}.$$

Само собою разумеется, что прохождение вершин необходимо начать со счета „нуль“, одновременно пустив в ход механизмы секундомера, поступая аналогично счету числа оборотов диска счетчика при его проверке. В таблице 1 даны частоты f'_{om} для различных фигур, начиная с треугольника, вычисленные по формуле

$$f'_{om} = 250 \frac{z}{m},$$

причем верхний предел f'_{om} ограничен частотой 100 Hz. Для составления набора фигур, как сказано, необходимо так их подобрать, чтобы между соседними частотами f'_{om} была бы разница $\Delta f'_{om}$ меньше, чем $2 \cdot 0,2 p$; в нашем случае это будет $\Delta f'_{om} = 2 \cdot 0,2 \cdot 10 = 4$ Hz. Из таблицы видно, что такой набор выполнить вполне возможно, причем нет необходимости прибегать к наблюдению двойных и тройных фигур. Удобно скомбинировать на одном диске ряд фигур так, чтобы они охватывали определенный участок частот, например, для измерения частот до 100 Hz, как это было намечено Лабораторией, достаточно четырех дисков с фигурами, удобными для измерения от 20 до 40 Hz, от 40 до 60, от 60 до 80 и от 80 до 100 Hz; частоты

от 0 до 20 Hz не нуждаются в стробоскопическом методе, так как при этих частотах скорость вращения синхронного мотора с 20 полюсами настолько мала (2 об/сек максимум), что измерение скорости вращения вполне доступно непосредственно, при помощи счета числа оборотов. В таблице 2 приведены числа сторон фигур и их комбинации, могущие обеспечить указанные условия для измерения частот, а на рис. 7 их уменьшенное изображение. Как видно, все фигуры, имеющие число углов большее шести, имеют зубчатое

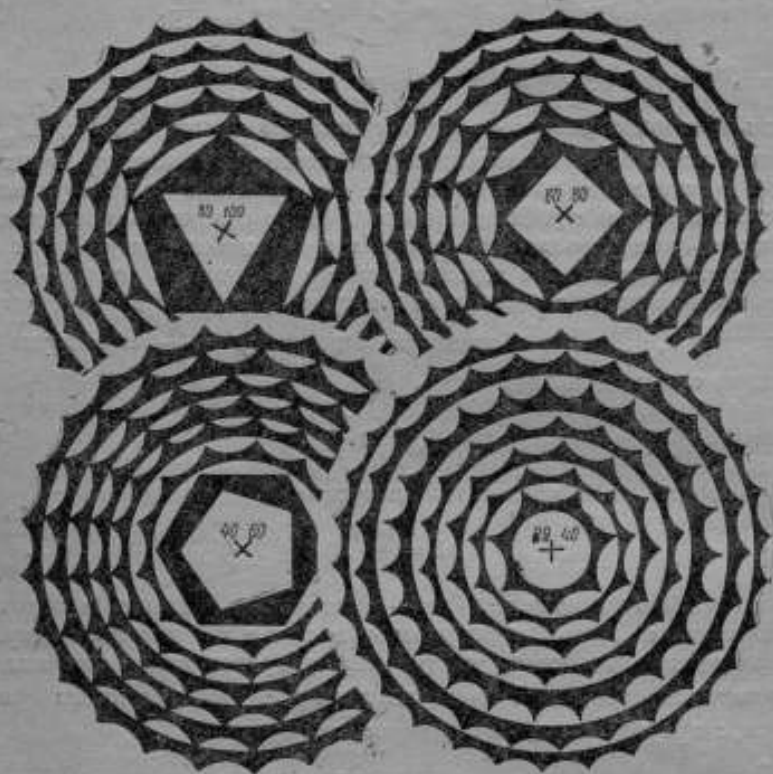


Рис. 7.

очертание, составленное из отрезков дуг окружностей; такой вид их, согласно произведенных опытов, обеспечивает наибольшую устойчивость стробоскопической картины. На рис. 8 изображен диск с небольшим числом комбинаций фигур — квадрат, пятиугольник, шестиугольник и тридцатиугольник, позволяющие производить измерения более грубо, причем приходится прибегать к наблюдению двойных и тройных фигур; устойчивость стробоскопической картины хорошая. На рис. 9 дан один из опытных дисков с большим числом комбинаций, причем фигуры состоят просто из ряда правильно расположенных точек; такие фигуры дают крайне беспокойную стробоскопическую картину, сильно утомляют глаза и поэтому Лабораторией не применяются. Формула (10)

может быть представлена графически, и для указанных наборов фигур получается диаграмма рис. 10. Здесь по оси абсцисс отложена частота в герцах, по оси ординат стробоскопические скорости вращения различных фигур в оборотах в секунду; каждой фигуре с определенным числом кратности z отвечает прямая, проходящая через соответствующую



Рис. 8.

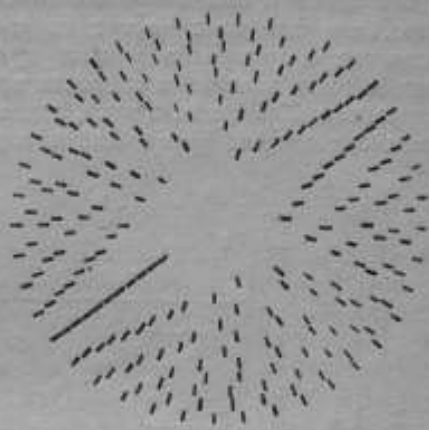


Рис. 9.

ую точку на оси абсцисс, наклоненную под одним и тем же углом $\gamma = \text{arctg } 10$. На рис. 10 представлена часть диаграммы, отве-

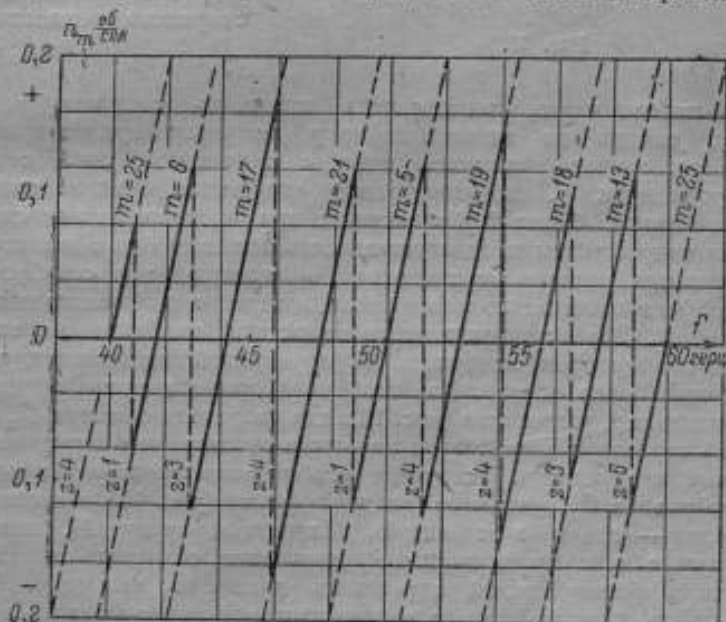


Рис. 10.

чающей наиболее употребительным частотам от 40 до 80 Hz; прямые представлены в виде отрезков, ограниченных так, чтобы переход

с одной фигуры на другую имел бы место при одинаковых численно величинах стробоскопических скоростей, но, конечно, разных знаков. Как видно из диаграммы, поставленное условие непревышения стробоскопической скорости вращения данной фигуры $\pm 0,2$ об/сек, т. е. 1 оборота в 5 сек, нигде выполняется. Из вида диаграммы рис. 10 ясно, что для всех частот данного диапазона условия наблюдения равноценны (одинаков наклон прямых), вследствие чего и влияние погрешности измерения скорости вращения для всех этих частот также одинаково. Возможна, однако, другая комбинация элементов установки, именно, возможно фониический мотор привести в движение прерывистым

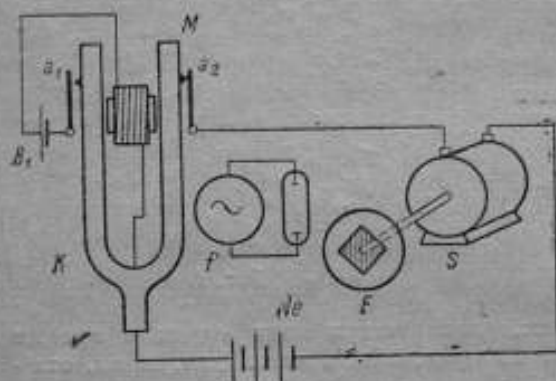


Рис. 11.

током от камертона, током же испытуемой частоты питать неоновую лампу, как это изображено схематически на рис. 11. В этом случае ось мотора, а, следовательно, и фигура будет вращаться с постоянной скоростью n_k , зависящей от частоты колебаний камертона f_k и от числа полюсов мотора — $2p_k$; как известно, эта скорость выражается формулой $n_k = k \frac{f_k}{p}$ об/сек,

где k — целое число, выражающее кратность скорости мотора, так как, смотря по первоначальному импульсу при запуске мотора, он может вращаться либо с ординарной, либо с двойной, тройной и т. д. синхронной скоростью. Число вспышек лампы, очевидно, будет $2f$ в секунду, при питании лампы синусоидальным напряжением продолжительность вспышки будет значительно более, чем при питании от камертона, благодаря чему стробоскопический эффект значительно менее резок, и картина получается неясной, расплывчатой. Для устранения этого недостатка необходимо специальным трансформатором испортить форму кривой напряжения, сделав ее возможно более острой. Для этой цели применялся трансформатор такого, например, устройства (рис. 12), где вторичная обмотка W_2 имеет железный сердечник значительно меньшего сечения, чем первичная W_1 , вследствие чего быстро наступает его насыщение, и форма кривой рабочего потока Φ_2 принимает плоскую форму (рис. 13), а вторичного напряжения — сильно заостренную. Магнитный шунт M , имеющий регулируемые воздушные зазоры δ , позволяет сохранить достаточно приличными форму кривой первичного тока и его величину. С помощью такого трансформатора возможно получить значительно лучший стробоскопический эффект при питании лампы от сети переменного тока, несравнимый все же с превосходной резкой картиной при работе от камертона. Применяя для данного случая, т. е. вида стробоскопической картины, получаемой от вращающейся с постоянной скоро-

стью n_p фигуры, имеющей m сторон и освещаемой лампой с числом $2f$ вспышек в секунду, те же рассуждения, что и в первом случае, легко найти для стробоскопической скорости вращения фигуры n_m

$$\pm n_m = k \frac{f_k}{p} - z \frac{2f}{m} \text{ об/сек.},$$

откуда искомая частота

$$f = \left(k \frac{f_k}{p} \mp n_m \right) \frac{m}{2z}$$

или

$$f = \frac{k}{z} \frac{m}{2p} f_k \mp \frac{m}{2z} n_m \quad (13)$$

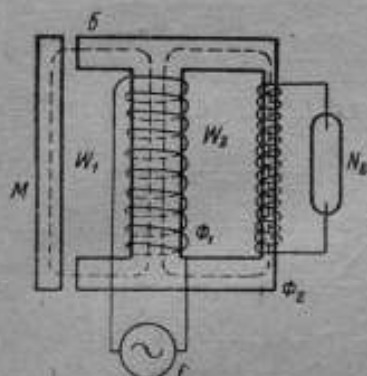


Рис. 12.

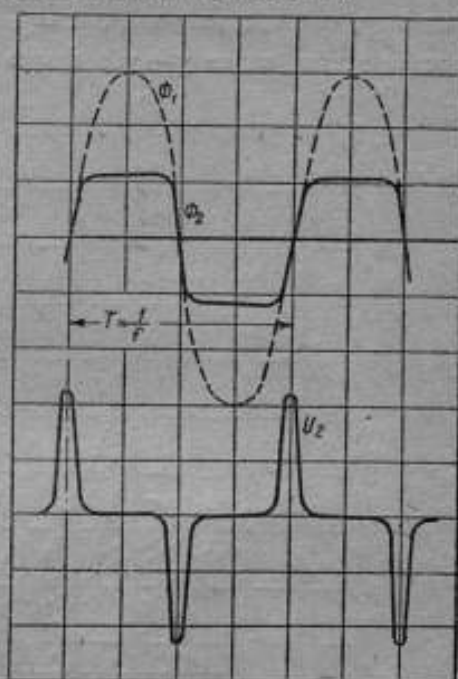


Рис. 13.

Неподвижной стробоскопической картине, т. е. $n_m = 0$, соответствует также ряд частот f_{0m} :

$$f_{0m} = \frac{k}{z} \frac{m}{2p} f_k.$$

Для установки Лаборатории, т. е. для случая $f_k = 25 \text{ Hz}$ и $2p = 20$, получаем

$$f_{0m} = \frac{m}{z} \frac{25}{20},$$

полагая, для простоты, что $k = 1$, т. е. фониический мотор идет с ординарной синхронной скоростью.

Таким образом для различных фигур можно составить таблицу 3 частот f_{0m} аналогично таблице 1.

Для двойных, тройных и т. д. синхронных скоростей мотора, т. е. для $k = 2, k = 3$, соответствующие значения частот f_{0m} получаются путем умножения табличных величин на множитель k . Как видно из рис. 14, где дана часть диаграммы, изображающей графически формулу (13), условия измерения частоты по этой схеме значительно хуже, чем по первой, так как для перекрытия данного диапазона частот необходимо использовать не только фигуры с разным числом сторон и наб-

люхоть двойные и тройные стробоскопические картины, но и давать мотору двойные и тройные синхронные скорости. При таком большом количестве не всегда легко определяемых параметров — k и z — можно впасть в ошибку, так как, например, $z = \frac{1}{3}$ и $z = \frac{2}{3}$ дают одну и ту же стробоскопическую картину — утроенную фигуру. Кроме того, так как

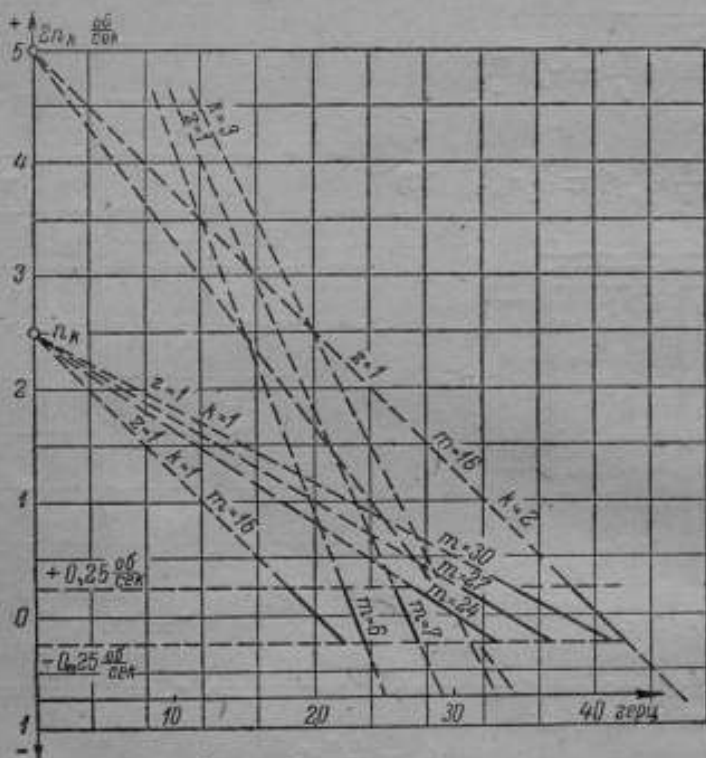


Рис. 14.

прямые графика теперь не параллельны друг другу (они все имеют общие точки пересечения, координаты которых $x=0$, $y=kn_k$), точность измерения сильно меняется в зависимости от измеряемой частоты. Всего этого достаточно, чтобы не пользоваться этой схемой, хотя она обладает тем преимуществом против первой, что стробоскопическая картина меньше мерцает (при частотах $f > 12,5$ Hz) и поэтому менее утомляет зрение, для чего нужно было бы применять в первой схеме камертон с большой частотой (50 Hz и более).

Применяемая аппаратура

Рабочая установка Лаборатории, служащая как для поддержания вперед заданной частоты генераторов переменного тока, так и для измерения любой частоты в пределах от 20 до 100 Hz, собрана по

принципиальной схеме рис. 3. Эталон частоты — камертон с электрическим возбуждением — имеет, как сказано, номинальную частоту колебания $f_k = 25$ Hz. Это — камертон фирмы Тинслей в Лондоне; рис. 15 дает его общий вид со снятой крышкой и рис. 16 — схему включения. Ветви камертона изготовлены из элинвара, благодаря чему влияние температурных изменений весьма незначительно; настройка на номинальную частоту производится перемещением грузиков на концах ветвей. Прерывающие контакты оригинальной конструкции, оказывающие минимум возмущающего действия, имеются у каждой ветви; одна пара служит для прерывания тока возбуждения, а также и тока индуктора неоновой лампы, через зажимы 1, 2, 3, другая пара может быть использована для включения в совершенно самостоятельную цепь через зажимы 4, 5; электромагнит возбуждения помещен между ветвями; для поддержания колебания достаточно источника тока с напряжением 2V, т. е. одного свинцового аккумулятора, причем тогда средняя сила тока возбуждения лежит между 180 и 200 mA. Для приведения в действие камертона в крышке имеется поворотная рукоятка, помощью которой возможно несколько сжать ветви и затем быстро освободить; начавшиеся колебания поддерживаются далее импульсами электромагнита. Камертон устанавливается на слое ваты для избежания передачи энергии колебания крышке стола, что сильно сказывается на устойчивости работы. Камертон был исследован в Лаборатории точного времени и определены его поправки и влияние различных факторов на величину периода колебания. Влияние изменения температуры, как и следовало ожидать, оказалось малым; камертон исследовался только при условии естественного колебания температуры среды, так как соответствующего термостата Лаборатория времени не имеет. При тех незначительных колебаниях температуры от нормальной, которые имеют место в помещениях Лаборатории времени, заметить изменение частоты камертона не удалось; так как температура помещения Лаборатории переменного тока тоже имеет хорошее постоянство, близкое к 20°, то можно не считаться с влиянием температуры. Гораздо более сказывается на частоте колебания камертона сила тока возбуждения — I_a . Для пределов изменения силы тока I_a от 180 до 280 mA можно применять такую зависимость частоты колебания камертона f_k от силы тока возбуждения, выведенную из наблюдений Лаборатории времени:

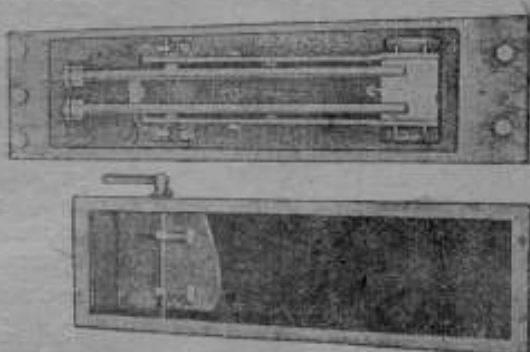


Рис. 15.

$$f_k = 25,0020 - 0,000555 (I_a - 180) + \\ + 0,00000223 (I_a - 180)^2 \text{ герц.} \quad (14)$$

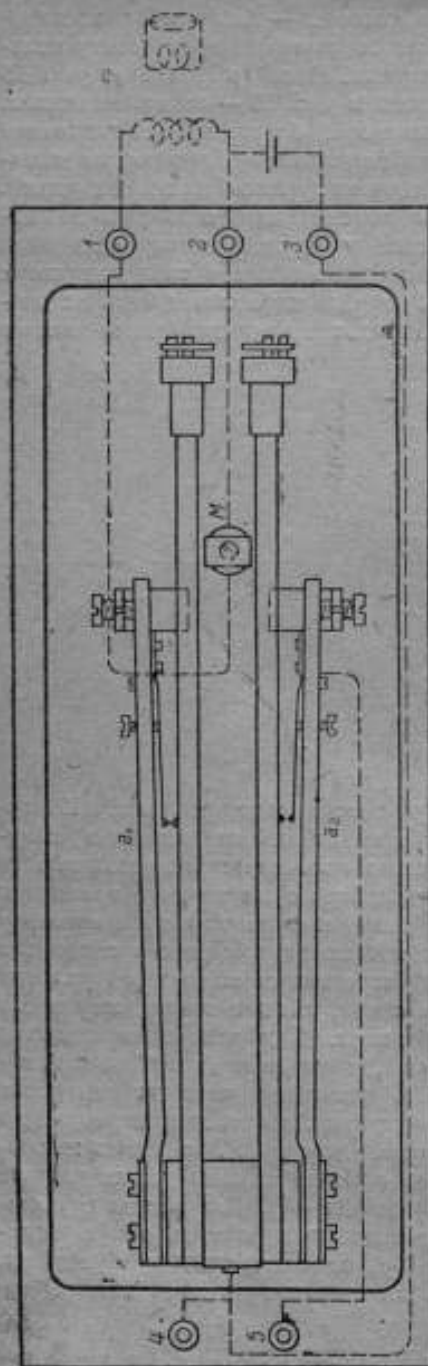


Рис. 16.

Как видно, при силе тока возбуждения, близкой к 185 мА, частота камертона f_k почти равна номинальной частоте f_{kn} 25 Hz, и только при значительных отклонениях тока I_0 от 185 мА, поправочный множитель

$$[h = \frac{f_k}{f_{kn}} = \frac{f_k}{25}$$

заметно отличается от единицы и должен быть принят во внимание. Остальные влияния внешней среды — изменение давления, влажности и т. д. — настолько незначительны, что ими вполне можно пренебречь.

Неоновая газосветная лампа, получающая кратковременные импульсы тока с частотой камертона, имеет устройство, схематически показанное на рис. 17. Трубка a — наружная оболочка лампы — наполнена неоном при низком давлении и имеет два впаиваемых электрода I_1 и I_2 . Электрод I_1 отделен от остального объема лампы перегородкой b , в которую впаяна капиллярная трубка t , несколько раз изогнутая зигзагом внутри оболочки и имеющая свободный открытый конец поблизости к электроду I_2 . Таким образом, если между электродом приложить достаточно большое напряжение, весь капилляр заполнится тлеющим разрядом, имеющим, в виду большой общей поверхности капилляра, достаточно большую силу света, хорошо освещающую стробоскопическую фигуру. Зажигающее напряжение имеющихся в Лаборатории ламп имеет величину порядка 2000 В, вследствие чего лампу необходимо присоединить к камертону через соответствующий индуктор. Источником тока для лампы обычно служит тот же аккумулятор, который питает и цепь возбуждения; схема включения дана на рис. 16. Такое большое зажигающее напряжение выбрано с той целью, чтобы через

лампу проходил только импульс тока от э. д. с. размыкания; от э. д. с. при замыкании первичной цепи индуктора лампа не зажжется, и ток



Рис. 17.

не пройдет, ввиду значительно меньшей величины амплитуды этой э. д. с. Таким образом обеспечивается частота вспышек лампы, равная частоте камертона. Лампа этой конструкции служит очень долго, так как наружная оболочка *a* является резервуаром с достаточным запасом неона.

Синхронный фониический мотор, также фирмы Тинслей, изображен на рис. 18 и 19 (общий вид и схематический разрез). Обмотка возбуждения и кольцевая катушка *K*, расположенная в выточке статора *S*, образуют магнитный поток, замыкающийся через зубцы полюсов ротора *r*; такой мотор работает достаточно устойчиво при питании его прерывистым током одного направления напряжением 15—20 В. Для вращения его от камертона аккумуляторная батарея соответствующего



Рис. 18.

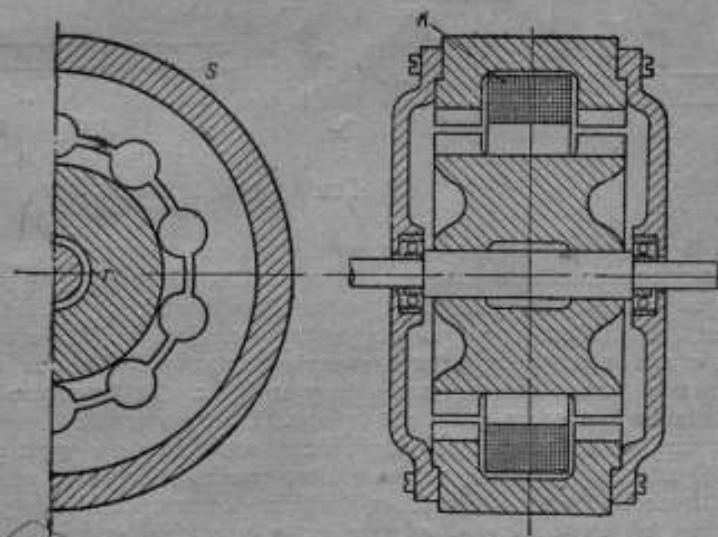


Рис. 19.

щего напряжения присоединяется к обмотке мотора через вторую пару контактов и зажимы 4—5 камертона; для пуска в ход необхо-

димо развернуть его предварительно от руки, сообщив угловую скорость, немного большую синхронной, и одновременно включить цепь; ротор войдет в синхронизм и будет продолжать вращаться самостоятельно. Направление вращения может быть выбрано любое; точно также от величины первоначальной скорости зависит, будет ли мотор вращаться с ординарной, двойной, тройной и т. д. синхронной скоростью. При питании такого мотора от цепи переменного тока необходимо трансформатором понизить напряжение сети до указанных пределов и далее задержать полупериоды одного знака, так как на переменном токе мотор этого типа работает неустойчиво (качания синхронной скорости, частое выпадение из синхронизма и нагревание магнитной цепи). Пуск в ход производится так же, как и в первом

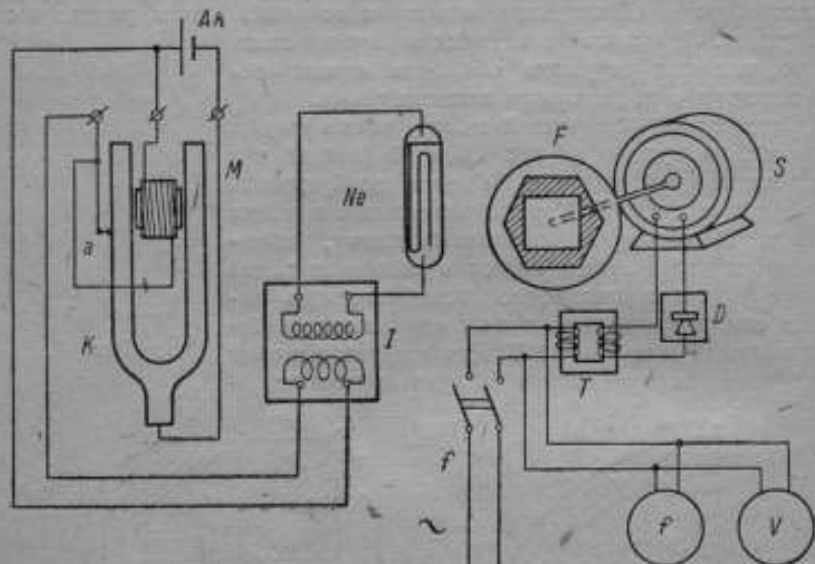


Рис. 20.

случае. В качестве детектора, задерживающего полуволну, применен сухой купроксидный выпрямитель Siemens-Schuckert для зарядки аккумуляторов с соответствующим переключением элементов выпрямителя со схемы Греча на простую полуволновую. На рис. 20 приведена полная схема включения всех элементов установки. На оси мотора насаживаются стробоскопические фигуры (рис. 7), которые и рассматриваются при свете неоновой лампы. Для того чтобы можно было производить наблюдение при общем освещении, лампа и диск с фигурами помещены внутри ящика, имеющего только небольшое отверстие для наблюдения фигур. Общий вид всей установки приведен на рис. 21, где справа виден камертон, а наверху в удобном для наблюдателя положении ящик с неоновой лампой и фониическим мотором, с насаженным на оси стробоскопическим диском. Эта установка работает уже с 1928 г.; при ее помощи производятся, во-первых, все точные измерения частоты при работе на потенциометрах переменного тока

и при исследовании и поверках частотомеров, и, во-вторых, контролирование и поддерживание вперед заданной частоты генераторов Лаборатории. В первом случае наблюдатель, вооруженный секундомером, считает число углов стробоскопической фигуры, проходящих мимо какого-либо неподвижно укрепленного против диска предмета (черный бумажный треугольник, приклеенный в вертикальном положении ко дну ящика на некотором расстоянии от диска), отмечая и направление кажущегося вращения знаком $+$ по направлению вращения мотора и $-$ против. Фигура выбирается наиболее медленно вращающаяся, причем для проверки полезно сделать отчеты по двум фигурам, вращающимся и противоположные стороны. Необходимо сосчитать такое число прошедших углов фигур, чтобы измеренное время было около минуты

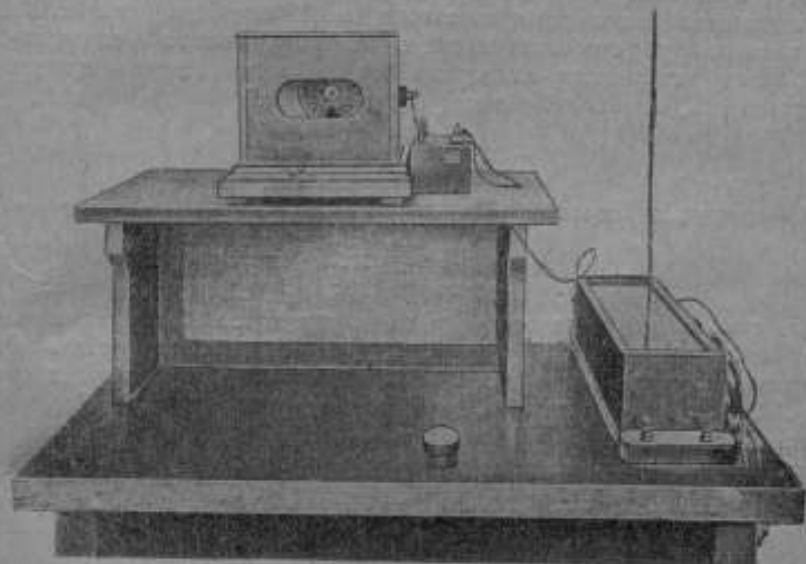


Рис. 21.

или целое кратное), так как этим уменьшается ошибка шкалы секундомера, вследствие эксцентриситета. Вычисление величины искомой частоты производится по формуле (12). Во втором случае для поддержания заданной частоты генератора скорость двигателя генераторной группы регулируется так, чтобы кажущаяся скорость соответствующей стробоскопической фигуры сохранялась постоянной, равной той, которая отвечает заданной частоте. Для этой цели необходимо, чтобы наблюдатель у стробоскопа имел под рукой шунтовой реостат двигателя генераторной группы, что, конечно, легко осуществить при помощи соответствующей проводки. Дело обычно значительно упрощается, когда заданная частота — стандартная — 50 Hz, которой, как видно из таблицы 1, соответствует нулевая стробоскопическая скорость нескольких фигур (пятиугольник, двенадцатиугольник). Таким образом в этом частном случае достаточно так регулировать скорость двигателя, чтобы, например, пятиугольник совершенно не вращался. При

установившемся режиме цепи двигателя, прогретых обмотках якоря и возбуждения и установившейся в д. с. аккумуляторной батареи, такое неподвижное положение пятиугольника можно наблюдать в течение больших промежутков времени, и, следовательно, быть уверенным в постоянстве частоты рабочего генератора. Как камертон, так и фонирующий мотор могут работать вполне устойчиво и без вреда для себя продолжительное время, часами и более. Вообще стробоскопический метод оказался на практике весьма удобным, удовлетворяющим всем приведенным выше условиям точного измерения частоты; единственным недостатком его является утомляемость глаз наблюдателя вследствие мерцания освещения, что можно исправить, увеличив частоту колебания эталонного камертона, например, до 100 Гц. Наблюдающееся иногда колебание синхронной скорости мотора, дающее беспокойную стробоскопическую картину, быстро утомляющую глаз, легко устраняется подтормаживанием мотора легким нажимом пальца на ось, отчего колебания успокаиваются.¹

Точность метода

В формулу, определяющую частоту

$$f = \frac{zp}{m} f_k + \frac{p}{m} \frac{N}{t},$$

входит три величины, от точности измерения которых зависит и точность измерения частот, а именно: частота колебания эталонного камертона f_k , число отсчитанных вершин фигуры N за время t и само время t . Остальные величины, входящие в формулу: z , p и m , трактуются как постоянные коэффициенты. Таким образом частные погрешности, вносимые неточностью измерения величин f_k , N и t , будут

$$\begin{aligned} \Delta_{f_k} &= \frac{zp}{m} \delta f_k \\ \Delta_N &= \frac{p}{mt} \delta N \\ \Delta_t &= -\frac{pN}{mt^2} \delta t. \end{aligned} \quad (15)$$

Наибольшая вероятная абсолютная ошибка измерения частоты f будет тогда

$$\Delta_f = \pm \sqrt{\Delta_{f_k}^2 + \Delta_N^2 + \Delta_t^2} = \pm \frac{p}{m} \sqrt{(z\delta f_k)^2 + \left(\frac{\delta N}{t}\right)^2 + \left(\frac{N}{t^2} \delta t\right)^2}. \quad (16)$$

При пользовании обычным секундомером погрешность при измерении времени составит $\delta t \approx 0,2$ сек, так как маятник часов секундомера делает 5 колебаний в секунду, и следовательно стрелка движется через $\frac{1}{5}$ секунды. Погрешность измерения числа прохождения вершин фигуры δN зависит, конечно, в сильной степени от индивидуальных

¹ См. инструкцию ГУМВ № 161 — Измерение частоты электрического переменного тока стробоскопическим методом.

особенностей наблюдателя; можно положить, что достаточно опытный наблюдатель сможет сосчитать число N с ошибкой $\delta N = \pm 0,1$. Погрешность определения частоты камертона δf_z зависит от степени совершенства выполнения камертона, главным образом от качества примененных материалов. Погрешность δf_z может быть принята порядка 0,005 Hz, что вполне достижимо при хорошем выполнении, получение же большей точности, как видно из формулы (16), в сущности бессмысленно, так как это уже не влияет на окончательный результат. Из рассмотрения формулы (16) видно, что для уменьшения погрешности измерения необходимо так вести наблюдение, чтобы работа производилась с фигурами, имеющими большое число сторон m , отсчитывая возможно больший промежуток времени t ; кратность z должна быть при этом возможно меньшей. Применяя формулу (16) для случая работы на установке Лаборатории при измерении частоты вблизи $f = 50$ Hz, что является наиболее частой задачей, получим следующие результаты, подставляя величины: $p = 10$, $m = 5$, $z = 1$; приняв $t \approx 60$ сек и предположив, что пятиугольник имеет стробоскопическую скорость не более 0,2 об/сек, или 12 об/мин, получим $N = 5 \cdot 12 = 60$. Тогда

$$\Delta = \pm \frac{10}{5} \sqrt{(0,001)^2 + \left(\frac{0,1}{60}\right)^2 + \left(\frac{60 \cdot 0,2^2}{60}\right)^2} \approx \pm 0,0075 \text{ Hz.}$$

Таким образом при измерении частот в интервале от 42 до 51 Hz вероятная ошибка измерения будет не более $\pm 0,0075$ Hz или относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} \cdot 100 \approx \pm 0,015\%.$$

Таблица 1

Частоты $f_{\text{син}}$ для номинальной частоты камертона $f_{\text{кал}} = 25$ Hz и числа полюсов синхронного мотора $2p = 20$.

Синхронный мотор питается исследуемым переменным током.

Число сторон фигуры m	Частота $f_{\text{син}}$ в герцах для:							
	$z = \frac{1}{3}$	$z = \frac{1}{2}$	$z = 1$	$z = 2$	$z = 3$	$z = 4$	$z = 5$	$z = 6$
3	27 $\frac{2}{3}$	41 $\frac{2}{3}$	83 $\frac{1}{3}$	—	—	—	—	—
4	20 $\frac{3}{4}$	31 $\frac{1}{4}$	62 $\frac{1}{2}$	—	—	—	—	—
5	—	25	50	100	—	—	—	—
6	—	20 $\frac{3}{5}$	41 $\frac{2}{5}$	83 $\frac{1}{5}$	—	—	—	—
7	—	17 $\frac{2}{7}$	35 $\frac{4}{7}$	71 $\frac{2}{7}$	—	—	—	—
9	—	—	27 $\frac{3}{9}$	55 $\frac{2}{3}$	83 $\frac{1}{3}$	—	—	—
11	—	—	22 $\frac{6}{11}$	45 $\frac{3}{11}$	68 $\frac{6}{11}$	90 $\frac{0}{11}$	—	—
13	—	—	19 $\frac{6}{13}$	38 $\frac{3}{13}$	57 $\frac{6}{13}$	76 $\frac{12}{13}$	—	—
15	—	—	—	33 $\frac{4}{5}$	50	66 $\frac{2}{3}$	—	—
17	—	—	—	29 $\frac{8}{17}$	44 $\frac{16}{17}$	58 $\frac{16}{17}$	78 $\frac{16}{17}$	88 $\frac{16}{17}$
19	—	—	—	26 $\frac{18}{19}$	39 $\frac{18}{19}$	52 $\frac{18}{19}$	65 $\frac{18}{19}$	78 $\frac{18}{19}$
21	—	—	—	22 $\frac{12}{21}$	35 $\frac{12}{7}$	47 $\frac{12}{21}$	59 $\frac{12}{21}$	71 $\frac{12}{7}$
23	—	—	—	21 $\frac{12}{23}$	32 $\frac{12}{23}$	43 $\frac{12}{23}$	54 $\frac{12}{23}$	65 $\frac{12}{23}$
25	—	—	—	20	30	40	50	60
26	—	—	—	19 $\frac{12}{13}$	28 $\frac{12}{13}$	38 $\frac{12}{13}$	48 $\frac{12}{13}$	57 $\frac{12}{13}$
30	—	—	—	—	25	33 $\frac{1}{3}$	42 $\frac{2}{3}$	50

Таблица 2

Комбинации фигур на дисках для измерения частот от 20 до 100 Hz
 $(f_{kn} = 25 \text{ Hz}; 2p = 20)$

№№ дисков	Порядковый номер фигуры от центра	Число вершин m	f_{0m} точное в Hz	f_{0m} приближенное в Hz	№№ дисков	Порядковый номер фигуры от центра	Число вершин m	f_{0m} точное в Hz	f_{0m} приближенное в Hz
№ 1 От 20 до 40 Hz	6	25	20	20,0000	№ 3 От 60 до 80 Hz	6	25	60	60,0000
	2	11	$22^{2/11}$	22,7373		1	4	$62^{3/4}$	62,5000
	7	30	25	25,0000		5	23	$65^{2/23}$	65,2174
	4	18	$27^{1/9}$	27,7778		3	11	$68^{2/11}$	68,1818
	6	25	30	30,0000		6	25	70	70,0000
	5	23	$32^{1/23}$	32,6087		2	7	$71^{3/7}$	71,4286
	7	30	$33^{2/3}$	33,3333		7	30	75	75,0000
	1	7	$35^{5/7}$	35,7143		4	13	$76^{12/13}$	76,9231
	3	13	$38^{6/13}$	38,4615		6	25	80	80,0000
	6	25	40	40,0000		—	—	—	—
№ 2 От 40 до 60 Hz	8	25	40	40,0000	№ 4 От 80 до 100 Hz	6	25	80	80,0000
	2	6	$41^{1/3}$	41,6667		1	3	$83^{1/3}$	83,3333
	4	17	$44^{2/17}$	44,1176		5	23	$86^{2/23}$	86,9565
	7	21	$47^{1/21}$	47,6190		6	25	90	90,0000
	1	5	50	50,0000		3	11	$90^{10/11}$	90,9091
	6	19	$52^{12/19}$	52,6316		4	16	$93^{3/4}$	93,7500
	5	18	$55^{1/3}$	55,5556		7	26	$96^{2/13}$	96,1538
	3	13	$57^{9/13}$	57,6923		2	5	100	100,0000
8	25	60	60,0000	—	—	—	—	—	

Таблица 3

Частоты f_{0m} для случая питания фониического мотора с числом полюсов $2p = 20$ от камертона с номинальной частотой $f_{kn} = 25 \text{ Hz}$.

Неоновая лампа питается исследуемым переменным током, фониический мотор вращается с ординарной синхронной скоростью ($k = 1$).

Число сторон фигуры m	Частота f_{0m} в герцах для:			
	$z = \frac{1}{3}$	$z = \frac{1}{2}$	$z = \frac{2}{3}$	$z = 1$
4	15	10	7,5	5
5	18,75	12,5	9,375	6,25
6	22,5	15	11,25	7,5
7	26,25	17,5	13,125	8,75
11	—	27,5	—	13,75
13	—	32,5	—	16,25
17	—	—	—	21,25
19	—	—	—	23,75
23	—	—	—	28,75
30	—	—	—	37,5

Для большинства исследовательских работ, не говоря уже о поверках частотомеров, такая точность измерения частоты вполне достаточна, тем более, что почти невозможно поддерживать скорость двигателей генераторной группы с такой же точностью. В других областях частот могут быть более неблагоприятные соотношения входящих в формулу (16) величин, однако легко показать, что величина относительной погрешности измерения частот в интервале от 20 до 100 Гц нигде не превышает приблизительно утроенной величины погрешности для $f = 50$ Гц, т.е. $\delta \approx \pm 0,05\%$. Само собою разумеется, что всегда можно, при желании, несколько увеличить точность, применяя более точные методы измерения времени t , дающего наибольшую частую погрешность δt , например, удлиняя его продолжительность.¹

Заключение

Разбираемый метод вполне оправдал себя в практике работы Лаборатории переменного тока и может быть рекомендован как простой надежный эталонный метод измерения частоты переменного тока с точностью до тысячных долей герца. Камертон с частотой колебания 25 Гц может служить для измерения с этой точностью частот от 20 до 100 Гц, для больших же частот, вследствие увеличения стробоскопической кратности z и уменьшения поэтому точности измерения, необходимо применять эталонные камертоны с соответственно большей частотой колебаний, или мотор с большим числом полюсов. Нетрудно видеть, что этот метод может быть применен и для измерений в области акустических частот.

N. A. Marenin

MÉTHODE NORMALE DE LA MESURE DES FRÉQUENCES TECHNIQUES

Résumé

On aperçu des méthodes praticables de mesurer les fréquences techniques directement par la comparaison avec une pendule de précision ou un diapason étalon est suivi d'un examen détaillé de la théorie des phénomènes stroboscopique et de leur adaptation à la mesure des fréquences. On démontre la qualité très avantageuse de la méthode stroboscopique — la possibilité du contrôle de la fréquence et de l'établissement de la fréquence voulue avec le degré de précision donné. On décrit les appareils du montage stroboscopique du Laboratoire du courant alternatif de l'Institut de Métrologie de l'URSS, servant à la mesure exacte des fréquences dans les limites de 20 à 100 hertz. On détermine les sources des erreurs et la valeur de l'erreur obtenue de la mesure qui se trouve être dans les limites de $\pm 0,0075$ hertz à $\pm 0,002$ hertz.

¹ Подробнее см. в этом сборнике статью А. А. Чечуанина „Точность стробоскопического метода измерения частоты.“

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ОТ 100 ДО 1000 Hz

Для большинства исследовательских работ при повышенных частотах необходимо точное измерение частоты.

Стробоскопическим методом, описанным в статье проф. Н. А. Маренина, возможно измерение частот лишь до 100 Hz.

Поэтому необходимо выбрать метод измерения частоты в пределах от 100 до 1000 Hz.

Из ряда методов, пригодных для измерения звуковых частот, наибольшее распространение получили способы измерения частоты при помощи специальных мостовых схем. Одна из подобных схем изображена на рис. 1. При отсутствии тока в контуре вибрационного гальванометра G величины емкости C , взаимной индукции M и частоты f удовлетворяют следующему уравнению:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}} \quad (1)$$

где f — частота, выраженная в герцах; M — взаимная индукция в Генри и C — емкость в фарадах. Отсюда

$$MC = \frac{1}{4\pi^2 f^2} \quad (2)$$

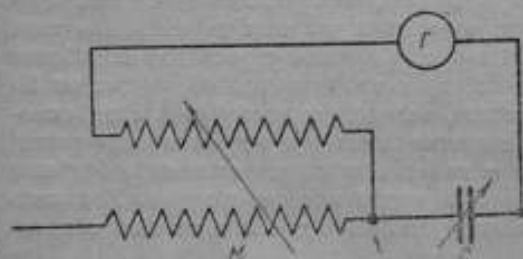


Рис. 1.

Применение мостового метода для частот, начиная от 100 Hz, встречается с трудностью применения больших взаимных индукций. Действительно, подставляя в выражение (2) значение $f = 100$ Hz и принимая емкость применяемого конденсатора $C = 10 \mu\text{F}$, что является весьма большой величиной, имеем значение:

$$M = \frac{10^6}{4\pi^2 \cdot 100^2 \cdot 10} = 0,25 \text{H} = 250 \text{mH}.$$

Производя аналогичный подсчет для других частот, получаем следующую таблицу взаимных индукций для $C = 10 \mu\text{F}$.

Частота в Hz	Взаимная индукция в мH	Произведение CM
100	250,0	$2,5 \cdot 10^3$
200	62,5	$0,62 \cdot 10^3$
400	15,6	$0,156 \cdot 10^3$
800	3,9	$0,039 \cdot 10^3$
1000	2,5	$0,025 \cdot 10^3$

Из этой таблицы видно, что в виду быстрого уменьшения произведения CM при больших частотах мостовой метод практически более применим, так как аппаратура получается менее громоздкой.

Точность этого метода может быть определена из рассмотрения

выражения (1). Взяв частные производные по каждой из входящих в выражение для f величины и разделив на выражение f из (1), имеем:

$$\frac{\partial f}{\partial M} \Delta M = -1/2 \cdot \frac{\Delta M}{M}; \quad \frac{\partial f}{\partial C} \Delta C = -1/2 \cdot \frac{\Delta C}{C}.$$

Вероятная погрешность наблюдений, выраженная в процентах получится из следующего выражения:

$$\frac{\Delta f}{f} \cdot 100 = \sqrt{\left(-1/2 \frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(-1/2 \frac{\Delta C}{C}\right)^2} \cdot 100.$$

Если взаимдукция и емкость измерены с точностью до 1% , т. е. $\frac{\Delta M}{M} \cdot 100 = 1,0$ и $\frac{\Delta C}{C} \cdot 100 = 1,0$, то процентная вероятная погрешность измерения частоты —

$$\frac{\Delta f}{f} \cdot 100 = \sqrt{(-1/2 \cdot 0,01)^2 + (-1/2 \cdot 0,01)^2} \cdot 100 = 0,71\%$$

и, соответственно, при M и C , измеренных с точностью до $0,10\%$ процентная погрешность измерения равна $0,07\%$.

Последняя из указанных точностей измерения является для мостовых схем предельной, так как измерение емкости и взаимдукции с точностью, большей $0,1\%$, практически весьма затруднительно.

Для получения большей точности измерения частоты в интервале от 100 до 1000 Hz возможно применять стробоскопический способ измерения частот, схема и теория которого приведены в статье проф. Н. А. Маренина в этом сборнике. Как выведено и упомянутой статье, частота

$$f = \left(\frac{f_k \cdot z}{m} \pm N_m\right) p, \quad (3)$$

где $N_m = \frac{n_m}{t \cdot m}$ — кажущееся число оборотов фигуры в секунду; p — число пар полюсов синхронного мотора, f_k — число колебаний камертона в секунду, z — кратность фигуры; m — число сторон фигуры. Изменяя число пар полюсов применяемого мотора, возможно расширить предел измерения частот. Если для большей точности наблюдения задаться числом оборотов мотора при средней измеряемой частоте данного предела частот $n_{мот} = 600 \text{ об/мин}$, то при частоте камертона $f_k = 50 \text{ Hz}$ имеем числа пар полюсов:

Для интервала от	100	до 300	Hz	$p = 50$
"	"	300	" 500	" $p = 40$
"	"	500	" 700	" $p = 60$
"	"	700	" 900	" $p = 80$
"	"	900	" 1100	" $p = 120$

Для определения погрешности измерения частоты стробоскопическим способом найдем погрешности, вносимые измерением каждой из входящих в выражение (3) величин. Измеряемая величина — число кажущихся оборотов фигуры

$$N_m = \frac{n_m}{m \cdot t}$$

где n_m — число отсчитанных вершин за время t и m — число вершин данной фигуры. Погрешность ΔN_m может быть определена как погрешность измерения времени по секундомеру. Таким образом величинами, вносящими погрешность в измерение, являются: частота камертона f_k и время прохождения отсчитываемых вершин фигуры t . Погрешность от f_k :

$$\frac{\partial f}{\partial f_k} \cdot \Delta f_k = \frac{p \cdot z}{m} \cdot \Delta f_k,$$

и погрешность от отсчета времени t :

$$\frac{\partial f}{\partial t} \cdot \Delta t = \mp \frac{n_m p}{m} \cdot \frac{\Delta t}{t^2}.$$

Суммарная погрешность измерения:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{p \cdot z}{m}\right)^2 \cdot \Delta f_k^2 + \left(\frac{n_m \cdot p}{m}\right)^2 \left(\frac{\Delta t}{t^2}\right)^2} = \frac{p}{m} \sqrt{z^2 \Delta f_k^2 + \frac{n_m^2}{t^4} \cdot \Delta t^2} \quad (4)$$

При неподвижной фигуре, т. е. при частотах $f = \frac{f_k z}{m} p$, погрешность измерения равна погрешности, вносимой камертоном, так как $t = \infty$, и второй член (под корнем) выражения (4) равен нулю. В этом случае

$$\Delta f = \frac{p \cdot z}{m} \cdot \Delta f_k.$$

Величина f_k для камертона на 50 Hz может быть определена с точностью 0,005 Hz и $\Delta f_k = \frac{p \cdot z}{m} \cdot 0,005$ Hz или относительная погрешность:

$$\frac{\Delta f}{f} \cdot 100 = \frac{p \cdot z}{m} \cdot \frac{0,005 \cdot 100}{f} \text{‰}.$$

Относительная погрешность измерения для частот, при которых пятиугольник неподвижен (число оборотов мотора в этом случае равно 600 об/мин), например, для частоты $f = 200$ Hz, $p = 20$ пар полюсов, $m = 5$ и $z = 1$:

$$\frac{\Delta f}{f} \cdot 100 = \frac{20 \cdot 1}{5} \cdot \frac{0,005 \cdot 100}{200} = 0,01 \text{‰}.$$

Эта погрешность увеличивается при увеличении кажущейся скорости вращения фигуры.

При измерении частот до 100 Hz, возможно было ограничиться одним камертоном (25 или 50 Hz). При исследовании скоростей вращения фигур в интервалах выше 100 Hz, принимая во внимание, что отсчет

числа вершин более 120 в минуту затруднителен, ограничиться одним камертоном не оказалось возможным.

По формуле (3) были произведены подсчеты для интервала от 100 до 300 Hz для камертонов $f_k = 40$ Hz, $f_k = 50$ Hz и $f_k = 60$ Hz.

Параметры различных стоящих фигур при соответствующих частотах и при различных кратностях фигур приведены в таблицах 1, 2, 3. По данным этих таблиц составлена таблица 4, являющаяся одним из возможных решений вопроса измерения частот в интервале от 100 до 300 Hz. При составлении таблиц было принято во внимание, что отсчет более 120 вершин в минуту затруднителен. Однако в одном интервале не удалось подобрать фигуру при принятых камертонах и данных синхронных скоростях мотора, а именно, на частоте 214,1 число вершин в минуту допущено равным 135. Для избежания этого, возможно применить камертон, f_k которого равно 55 Hz.

В интервале от 192 до 208 Hz по таблице 4 отсчет может производиться по одному камертону 50 Hz и по одной фигуре (пятиугольник). Для этого интервала произведен подсчет погрешности измерения стробоскопическим способом.

Из подсчета видно, что величина относительной погрешности изменяется с увеличением кажущейся скорости вращения фигуры и достигает на крайних частотах интервала $0,105 \cdot 10^{-6}$ на частоте 192 Hz и $0,099 \cdot 10^{-6}$ на частоте 208 Hz.

Из всего вышесказанного очевидно, что стробоскопический способ дает значительно большую точность измерения, чем мостовой. Однако, измерения частоты стробоскопическим способом при необходимости применять набор различных камертонов и моторов представляют собой известную трудность и при измерениях частоты на больших интервалах и при отсутствии требования большой точности желательно применять какой-либо более грубый способ измерения частоты, хотя бы и мостовой способ.

Таблица 1

Частоты, соответствующие неподвижной фигуре при $f_h = 40$ Hz
и $p = 20$ пар полюсов

$m \backslash z$	$1/2$	1	2	3	4	5
3	133,3	266,6	533,8	800	—	—
4	100	200	300	400	—	—
5	80	160	320	—	—	—
6	66,7	133,3	266,6	400	—	—
7	57,15	114,3	228,6	342,9	—	—
9	44,45	88,9	177,8	266,7	355,6	—
11	36,4	72,8	145,6	218,4	287,6	—
13	30,8	61,6	123,2	184,8	248,4	—
17	23,5	47,1	94,2	141,3	188,4	—
19	21,0	42,1	84,2	126,3	168,4	—
21	19,0	38,1	76,2	114,3	152,4	190,5
23	17,4	34,8	69,6	104,4	139,2	174

Таблица 2

Частоты, соответствующие неподвижной фигуре при $f_h = 50 \text{ Hz}$
и $p = 20$ пар полюсов

$m \backslash z$	$1/2$	1	2	3	4	5
3	166,6	333,3	—	—	—	—
4	125	250	—	—	—	—
5	100	200	400	—	—	—
6	83,3	166,6	333,3	—	—	—
7	71,4	142,8	285,7	—	—	—
9	—	111,1	222,2	—	—	—
11	—	90,9	181,6	272,4	363,2	—
13	—	76,8	153,6	231	307,2	—
17	—	58,8	117,6	176,4	225,2	294,0
19	—	52,6	105,2	157,8	210,4	263,0
21	—	47,6	95,2	142,8	190,4	237,8
23	—	43,5	87,0	130,5	172	217

Таблица 3

Частоты, соответствующие неподвижной фигуре при $f_h = 60 \text{ Hz}$
и $p = 20$ пар полюсов

$m \backslash z$	$1/2$	1	2	3	4	5
3	200	400	800	—	—	—
4	150	300	600	—	—	—
5	120	240	480	—	—	—
6	100	200	300	—	—	—
7	85,7	171,3	342,6	—	—	—
9	66,6	133,3	266,6	400	—	—
11	54,5	109	218	327	—	—
13	—	92,3	184,6	276,9	—	—
17	—	70,6	141,2	211,8	—	—
19	—	63,2	126,4	189,6	252,8	316
21	—	57,1	114,2	171,3	228,4	285,5
23	—	52,2	104,2	156,6	208,8	261

Применение фигур и камертонов в различных интервалах

 $p = 20$

Интервал	m	z	f_k	Интервал	m	z	f_k
100 — 107,2	4	1	40	189 — 192	21	4	40
107,2 — 115	9	1	50	192 — 208	5	1	50
115 — 118	5	$1/3$	60	208 — 209,6	23	6	40
118 — 121	4	$1/2$	50	209,6 — 214,1	17	3	60
121 — 126	13	2	40	214,1 — 221,4	11	2	60
126 — 140	6	1	40	215 — 226	23	5	50
140 — 148	7	1	50	218 — 226	9	2	50
143 — 157	4	$1/2$	60	226 — 234	7	2	40
155 — 167	5	1	40	234 — 246	5	1	60
160 — 173,5	6	1	50	246 — 260	4	1	50
173,5 — 182,3	9	2	40	260 — 280	3	1	40
182 — 187	13	3	40	280 — 291,4	7	2	50
187 — 190	17	4	40	291,4 — 300	4	1	60

V. I. Krotova et S. V. Gorbatsvich

LA MESURE DES FREQUENCES DE 100 A 1000 HERTZ

Résumé

On décrit deux méthodes de mesurer les fréquences de 100 à 1000 hertz. La première méthode, dans laquelle on se sert d'une inductance mutuelle et d'une capacité, ne peut garantir qu'une précision ne dépassant pas 0,1%. La méthode stroboscopique, en utilisant plusieurs diapasons et plusieurs moteurs synchrones, peut assurer une précision de 0,01%.

Les tables 1—4 donnent une série de figures stroboscopiques pour l'intervalle des 100 à 300 hertz.

A. A. Чечулин

ТОЧНОСТЬ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

При всех относительных точных измерениях на переменном токе бывает необходимо измерять частоту, и хотя в распоряжении хорошо оборудованной лаборатории всегда имеется установка для измерения частоты весьма точным стробоскопическим методом, все же это измерение вносит свою долю в погрешность результата.

Для оценки погрешности, вносимой измерением частоты, в Лаборатории переменного тока ВНИИМа был проведен ряд таких измерений стробоскопическим методом. Измерения производились одновременно двумя наблюдателями. Сравнение результатов, полученных двумя наблюдателями, позволило оценить точность метода, а сравнение результатов последовательных измерений указало на наличие колебаний частоты и дало возможность оценить пределы этих колебаний и влияние последних на результат измерений.

Полученные данные приведены в таблицах 1 и 2 и для наглядности нанесены на графики на рис. 1 и 2. Рис. 1 отвечает случаю, когда

измерялась секундомерами продолжительность каждого из четырех последовательных кажущихся поворотов стробоскопической фигуры — пятиугольника — на угол $\frac{360}{5} = 72^\circ$.

На диаграмме (рис. 1) даны результаты измерений с 35 сериями с 4 отсчетами каждым наблюдателем в каждой серии. Длительность промежутка времени между последовательными сериями наблюдений не превышала одной минуты — срока, необходимого для записи показаний секундомера и установки его на нуль.

На рис. 2 даны результаты наблюдений промежутков времени поворота той же стробоскопической фигуры на угол $4 \times 72^\circ = 288^\circ$. В этом случае каждый из двух наблюдателей пускал в ход последовательно каждый из четырех секундомеров при следующих друг за другом прохождениях мимо визира вершин пятиугольника. Таким образом измерения, результаты которых приведены на рис. 2, дают среднюю частоту за время поворота стробоскопической фигуры на угол 288° , причем в каждой серии измеренные секундомером периоды времени частично накладывались друг на друга. Так как измерение заключалось в пуске мимо визира одной из вершин и остановке его при прохождении следующей (рис. 1) или 5-й (рис. 2), то индивидуальные особенности наблюдателя, главным образом продолжительность его рефлексов, практически роли не играли. Расхождение между результатами наблюдений обоих наблюдателей вызвано, как мы полагаем, только случайными погрешностями измерений, а расхождение между результатами отсчетов в разные моменты времени, достигающее 4 сек, имеет единственную причину — неравномерность хода генератора, повидимому неустраняемую волей экспериментатора в усло-

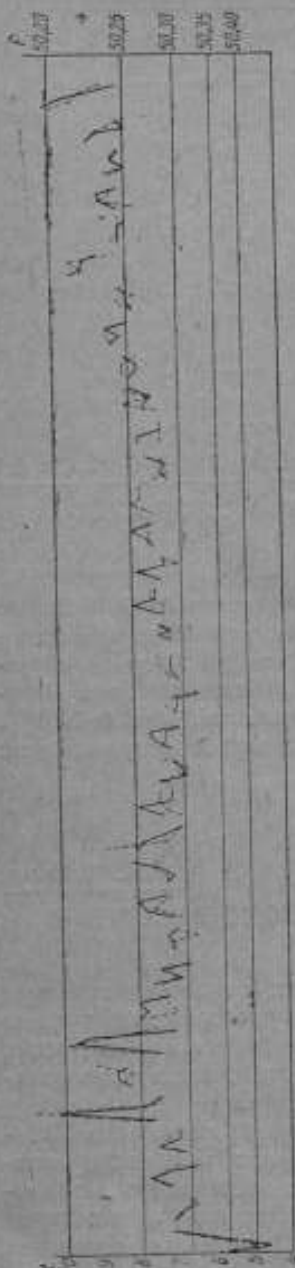


Рис. 1.

виях упомянутой лаборатории. Необходимо подчеркнуть, что в этих опытах генератор приводился в движение мотором постоянного

тока, питаемым от отдельной аккумуляторной батареи, и никакими иными приемниками энергии, кроме необходимых для этого опыта, нагружен не был. Перед опытом первой группы измерений мотор работал в течение 4—5 часов и поэтому безусловно должен был прийти в нормальное для данного режима состояние.

Из приведенных диаграмм следует, что за срок первой группы измерений (около 1 часа) частота изменялась на $\pm 0,1$ Hz, т. е. $\pm 0,2\%$, а за срок второй группы измерений (около 30 мин) — на несколько меньшую величину. Измене-

ние же частоты за одну серию первой группы измерений (около 35 сек) достигало в отдельных случаях 0,08 Hz и за одну серию наблюдений во второй группе (около 1 мин) — 0,04 Hz, причем в первом случае измерялась средняя частота за 5—10 сек, а во втором — за 32—45 сек. Таким образом от непостоянства частоты, происходящего от неравномерности вращения ротора мотора, колебания в результатах измерений таких величин, которые зависят от частоты, как, например, реактивного и полного сопротивления, могут достигнуть величины порядка сотых и даже десятых долей процента, если не выждать такого периода, когда частота изменяется не так значительно. Если же измерение начато и окончено в срок, в течение которого частота мало колебалась, то и в этом случае, как показывают диаграммы рис. 1 и 2, можно ожидать расхождений порядка $0,1\%$ или отклонений от среднего значения до $0,05\%$.

Приведенные результаты опыта позволяют оценить и величину случайной погрешности измерения технической частоты самым совершенным из существующих методов — стробоскопическим. Как было упомянуто, процесс измерения времени между нулевым и N -м прохождением вершины многоугольника мимо визира заключается в пуске и остановке секундомера нажатием его головки. В этом случае ошибка в моменте пуска, зависящая от длительности рефлекса наблюдателя,

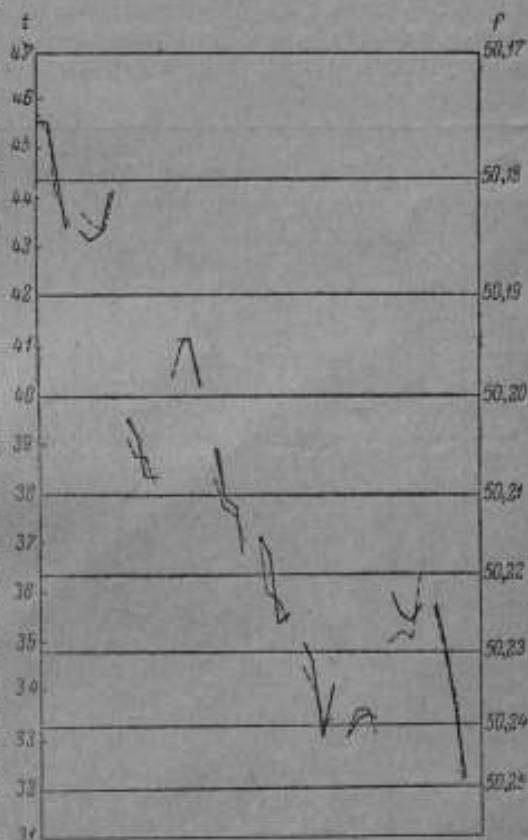


Рис. 2.

будет компенсироваться такой же ошибкой при остановке секундомера, и таким образом влияние индивидуальности наблюдателя можно считать мало вероятным. Вычислили среднюю квадратичную разностей между отсчетами двух наблюдателей, одновременно производящих измерения, и рассматривая эти разности как следствие случайных погрешностей измерений, можно оценить точность этого метода в условиях производства опыта. Результаты наблюдений и их обработки приведены в таблице 1 для первой группы измерений и в таблице 2 для второй группы. В первом столбце даны отсчеты по секундомеру, полученные первым наблюдателем, во втором — отсчеты второго наблюдателя (в секундах) и в третьем — их разность (в десятых секунды).

Таблица 1

t_1	t_2	$t_1 - t_2$	t_1	t_2	$t_1 - t_2$	t_1	t_2	$t_1 - t_2$	t_1	t_2	$t_1 - t_2$
5,8	5,8	0	8,6	8,2	4	7,2	7,4	-2	7,2	7,2	0
5,0	4,6	4	8,4	8,6	-2	6,8	6,6	2	7,8	7,8	0
5,8	6,2	-4	8,2	8,6	-4	6,6	6,8	-2	6,8	7,0	-2
7,4	7,2	2	9,2	8,4	6	7,2	7,0	2	7,2	7,2	0
7,2	7,2	0	7,8	7,4	4	7,4	7,0	4	7,6	7,4	2
7,0	7,0	0	10,0	9,8	2	7,2	7,4	-2	7,6	7,6	0
6,6	6,8	-2	9,0	9,4	-4	7,2	7,6	-4	7,6	8,0	-4
6,8	6,6	2	7,6	7,0	6	6,8	6,8	0	7,6	7,4	2
7,2	7,2	0	7,8	8,0	-2	7,4	8,0	-6	8,4	8,6	-2
7,8	7,8	0	7,0	7,8	+8	8,0	8,0	0	8,6	8,2	4
7,6	7,4	2	7,2	8,0	-8	7,8	8,0	-2	8,6	8,6	0
7,0	6,4	6	7,4	7,2	2	7,8	8,0	-2	8,0	8,0	0
7,0	6,8	2	7,4	7,6	-2	7,4	7,0	4	7,8	7,8	0
7,2	7,6	-4	7,0	6,8	2	7,0	7,2	-2	8,4	8,0	4
7,4	7,0	4	7,2	7,4	-2	7,2	7,0	2	7,8	8,0	-2
7,0	7,0	0	7,0	6,6	4	7,2	7,6	-4	8,4	8,2	2
7,8	7,6	2	7,0	7,0	0	7,2	7,8	-6	9,0	9,6	-6
10,8	10,2	6	7,2	7,0	2	7,2	7,8	-6	9,2	9,2	0
7,4	8,0	-6	6,4	7,2	-8	7,2	7,2	0	9,6	9,2	4
7,6	7,4	2	7,0	7,0	0	7,2	7,2	0	8,2	8,8	-6
6,8	7,0	-2	6,8	7,0	-2	7,2	7,6	-4	8,4	8,2	2
7,6	7,8	-2	7,2	6,8	4	8,2	7,6	6	8,2	8,2	0
7,4	8,0	-6	7,0	6,8	2	7,4	7,4	0	8,2	8,2	0
7,0	7,2	-2	6,2	6,2	0	8,2	8,0	2	8,2	8,0	2
7,2	7,2	0	6,8	6,8	0	8,2	8,0	2	7,6	8,2	-6
7,2	7,0	2	7,2	7,0	2	8,2	7,8	4	8,8	8,6	2
7,6	7,4	2	7,4	7,0	4	8,2	7,8	4	8,4	8,8	-4
7,4	8,2	-8	7,4	7,0	4	7,8	8,2	-4	8,4	8,2	2
8,8	8,0	8	7,2	7,0	2	8,4	8,6	-2	10,0	10,2	-2
7,2	7,8	-6	7,0	7,0	0	8,0	8,0	0	9,4	9,8	-4
7,0	7,2	-2	7,0	7,4	-4	8,4	8,4	0	9,2	9,0	2
6,8	6,8	0	7,4	7,0	4	8,2	8,2	0	8,6	8,2	4
6,8	7,2	-4	7,2	7,2	0	9,0	9,0	0	—	—	—
7,2	8,0	-8	7,2	8,0	-2	8,0	8,8	0	—	—	—
7,4	7,0	4	7,6	7,4	2	8,2	8,0	2	—	—	—
7,4	7,0	4	7,4	7,4	0	8,0	8,2	-2	—	—	—

Таблица 2

Средняя квадратичная разность между отсчетами двух наблюдателей $\pm 0,40$ сек (по материалам табл. 1).

Средняя квадратичная разность между отсчетами двух наблюдателей $\pm 0,41$ сек (по материалам табл. 2).

Если отсчет первого наблюдателя обозначить через t_1 , и второго — t_2 , то среднее их значение будет $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$ и остаточные погрешности

$$v_1 = t_1 - \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{t_1 - t_2}{2}$$

и

$$v_2 = t_2 - \frac{t_1 + t_2}{2} = -\frac{t_1 - t_2}{2}$$

Так как произведено N измерений каждым наблюдателем, а всего $2N$ измерений, то средняя квадратичная погрешность ряда из $2N$ измерений будет:

t_1	t_2	$t_1 - t_2$	t_1	t_2	$t_1 - t_2$
45,6	45,8	-2	39,6	39,2	4
45,6	45,4	2	39,2	38,8	4
44,6	44,2	4	38,4	38,8	-4
43,4	43,6	-2	38,4	38,2	2
43,4	43,8	-4	41,2	40,4	8
43,2	43,6	-4	41,2	41,0	2
43,4	43,4	0	41,2	41,4	-2
44,2	44,2	0	40,2	41,4	-2
39,0	38,4	6	33,0	33,0	0
38,0	37,8	2	33,4	33,6	-2
37,8	37,6	4	33,6	33,6	0
36,8	37,0	-2	33,4	33,0	4
37,2	37,2	0	35,0	36,0	-10
36,8	36,0	8	35,6	35,2	4
35,4	35,8	-4	35,4	35,0	4
35,0	35,4	2	35,8	36,4	-6
35,0	34,4	6	35,8	35,6	2
34,0	34,6	-6	35,0	34,8	2
33,0	33,2	-2	33,6	33,6	0
34,2	33,4	8	32,2	32,0	2

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2N} \left(\frac{t_1 - t_2}{2}\right)^2}{2N - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_1 - t_2)^2}{2(2N - 1)}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_1 - t_2)^2}{N}}$$

Применяя это выражение, пригодное только для нашего частного случая, мы избегаем вычисления средних из двух наблюдений, которые нас не интересуют. В качестве объективного фактора, позволяющего расхождение между отсчетами двух наблюдателей рассматривать только как результат случайных погрешностей измерений времени, служит левая диаграмма на рис. 3 и то, что

$$\frac{\sum (t_1 - t_2)}{N} = -\frac{0,6}{N}$$

составляет от

$$\frac{\sum (t_1 - t_2)}{N} = \frac{36,6}{N}$$

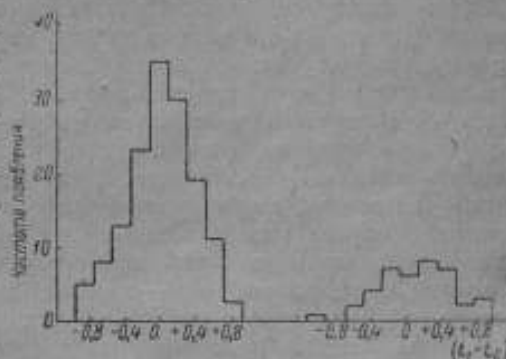


Рис. 3.

только 1,7%. Данные второй группы наблюдений, в виду их малочисленности, аналогичных заключений сделать не позволяют. Ординаты на рис. 3 дают частоты появления одинаковых разностей между

отсчетами двух наблюдателей. Правая диаграмма относится ко второй группе наблюдений.

Среднее квадратичное из расхождений ряда наблюдений первой группы $\pm 0,40$ сек и из наблюдений второй группы $\pm 0,41$ сек — величины, весьма близкие. Таким образом для значения σ получаем:

$$\sigma = \pm \frac{0,4}{2} = \pm 0,2 \text{ сек.}$$

Эта величина характеризует точность определения времени в процессе измерения частоты стробоскопическим методом в условиях, мало отличных от тех, какие имеются в Лаборатории переменных токов ВНИИМа. Исходя из значения σ , можно подсчитать вероятную погрешность ряда измерений частоты стробоскопическим методом и, что особенно нас интересует, значение предельной погрешности ряда измерений. В последнем случае мы примем для предельной погрешности трехкратное значение средней квадратичной погрешности $\Delta_{\text{lim}} = 3\sigma$, исходя из предположения, что вероятность получения большего значения будет менее 0,003.¹

Мы особо отмечаем, что нас интересует предельная погрешность, а не вероятная. Средняя квадратичная погрешность интересна только в той мере, в какой она позволяет вычислить предельную. При помощи любой из перечисленных погрешностей ряда измерений, т. е. вероятной, средней квадратичной и предельной, может быть охарактеризована точность процесса измерения. Точность же результата измерений, зависящая от числа повторных измерений, определяется вероятной, средней квадратичной или предельной погрешностью результата, и все они, будучи связанными постоянными отношениями, могут быть вычислены одна из другой. Однако, мы полагаем, что, все же, предельная погрешность, устанавливающая пределы, в которых заключается истинное значение измеряемой величины, дает непосредственное указание, удовлетворяет ли измеренная величина требованиям ОСТа, нормирующим точность измерения и допуски, т. е. устанавливающим пределы, за которые не должен выходить результат измерений. Вероятная же погрешность дает указание лишь о том, что одинаково вероятно как то, что истинное значение измеренной величины отличается от найденного измерением на величину, большую вероятной погрешности, так и то, что оно отличается от измеренного на величину, меньшую вероятной погрешности. В технических измерениях, где часто условия измерения не допускают повторных измерений вследствие изменений режима в сети, а также при поверках приборов на переменном токе приборами той же чувствительности, что в технике измерений переменного тока — явление довольно обычное, говорить о вероятной погрешности измерений, как мы полагаем, менее удобно, чем о предельной. Предельной же погрешностью, т. е. указанием, в каких пределах находится измеряемая величина, исчерпывающе характеризует точность результата измерения и дается ответ на вопрос о том, укладывается ли измеренная величина или погрешность пове-

¹ Проф. М. Ф. Маликов, Точные измерения, стр. 36.

ряемого прибора в заранее установленные нормы и, в частности, нормы ОСТа.

Итак, мы характеризуем точность процесса измерения и результата измерения соответственными предельными погрешностями, принимая их равными утроенному значению средних квадратичных погрешностей ряда измерений и результата, т. е. $\Delta_{lim} = 3\sigma$. Для оценки однократного измерения частоты можно воспользоваться приведенным выше статистическим материалом и, определив среднюю квадратичную погрешность, по этой величине вычислить предельную погрешность результата однократного измерения частоты стробоскопическим методом.

Из приведенного материала следует, что средняя квадратичная погрешность измерения времени при наблюдении кажущегося вращения стробоскопической фигуры будет $\sigma = 0,2$ сек и предельная погрешность $\Delta_{lim} = 3 \cdot 0,2 = 0,6$ сек. Как известно, частота, определяемая стробоскопическим методом, вычисляется по выражению:

$$f = \frac{f_k \cdot p}{m} z + \frac{Np}{mt^2}, \quad (1)$$

где f_k — частота образцового камертона, p — число пар полюсов реактивного мотора (типа фонического колеса), m — число сторон многоугольника (стробоскопической фигуры), z — целое число, определяемое по данным ориентировочного измерения частоты вибрационным частотомером, N — число промежутков между вершинами многоугольника (стробоскопической фигуры), которые прошли за время t мимо визира. Если погрешность в определении числа N отнести к величине t , определяемой совместно с ним при помощи секундомера, и принять таким образом N за число точное, то предельная погрешность определения частоты стробоскопическим методом может быть определена по выражению:

$$\Delta_f = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{f_k} p z}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_t N p}{t m}\right)^2}. \quad (2)$$

Из этого выражения следует, что погрешность измерения частоты зависит от значения измеряемой частоты, от которого зависят величины m и z . При благоприятных условиях, когда стробоскопическая фигура вращается очень медленно, т. е. при малом N , значение t — большое, второй член под корнем практически роли не играет, и предельная погрешность измерения частоты будет наименьшая и равная предельной погрешности частоты камертона Δ_{f_k} , умноженной на $\frac{pz}{m}$.

Например, при измерении частоты на установке, где $p = 10$, $m = 5$, и при $z = 1$, предельная погрешность измерения частоты для одного из наблюдений первой серии, для которого при $N = 1$ $t = 8$ сек, оказывается равной

$$\Delta_{f_{lim}} = \sqrt{\left(\frac{0,005 \cdot 10 \cdot 1}{5}\right)^2 + \left(\frac{0,6 \cdot 1 \cdot 10}{64 \cdot 5}\right)^2} = 0,02 \text{ Hz,}$$

что составляет 0,04% измеряемой частоты. В этом случае погрешность измерения зависит, главным образом, от второго члена под корнем. Если же на тот же угол стробоскопическая фигура повернется за $t = 40$ сек или более, то второй член под корнем $3 \cdot 10^{-5}$ по сравнению с первым 10^{-4} практически роли играть не будет, и точность измерения частоты будет зависеть только от постоянства образцового камертона.

В приведенном примере предельную погрешность частоты камертона мы принимаем равной $\Delta_{f_{\text{лим}}} = 0,005$ Hz. Эта величина была определена Акустической Лабораторией ВНИИМа при испытании применяемого в Лаборатории электрических токов образцового камертона на инвара фирмы Tinsley.

Итак, измерение промышленной частоты стробоскопическим методом может быть осуществлено в наиболее благоприятном случае с предельной случайной погрешностью 0,02% и в менее благоприятных эта погрешность может достигать значений 0,04—0,05%.

Приведенный выше материал позволяет попутно отметить, что колебания частоты генератора при измерениях на переменном токе даже в условиях хорошо оборудованной лаборатории с генератором, питаемым энергией от отдельной аккумуляторной батареи, может в значительной мере ухудшить результаты измерений. Для оценки их точности безусловно необходимо исследовать, в какой мере возможно поддерживать постоянство частоты переменного тока.

A. A. Čeculin

LA PRÉCISION DE LA MÉTHODE STROBOSCOPIQUE DE MESURER LA FRÉQUENCE

Résumé

Le traitement statistique des mesures répétées de la fréquence industrielle faites simultanément par deux observateurs a permis d'apprécier la précision de la méthode stroboscopique.

L'erreur relative limite de la mesure de la fréquence industrielle s'est trouvée être de 0,02 pour 100 dans le cas le plus favorable où le second membre de l'équation (2) étant minime, ne joue aucun rôle pratique, et où l'inconnue ne dépend que de la constance de la fréquence du diapason de la référence, à 0,04—0,05 pour 100 dans les cas moins favorables.

Les données statistiques exposées dans les fig. 1 et 2 ont permis de découvrir les variations de la fréquence du générateur, de noter leur influence sur la dépendance de la précision des mesures avec le courant alternatif de la durée de la mesure et de démontrer la nécessité d'étudier ces variations et de déterminer leur influence sur la précision des mesures.

СПОСОБ ПОВЕРКИ ОБРАЗЦОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО БРУКСУ

В стремлении создать образцовый трансформатор с минимальными погрешностями и углами сдвига в пределах нескольких минут Бруксом и Гольцем (H. В. Brooks and E. C. Holtz) был сконструирован образцовый трансформатор компенсированного типа.

Этот трансформатор имеет два сердечника (*A* и *B*) и три обмотки. Первичная обмотка расположена на обоих сердечниках, вторичная — частично на обоих сердечниках и частично только на одном *B*; компенсирующая обмотка намотана только на одном сердечнике *B*. Расположение обмоток ясно из схемы рис. 1. Отношение числа витков первичной и вторичной обмоток на сердечнике *B* точно равно номинальному коэффициенту трансформации. Обмотки намотаны навстречу.

Если $I = kI_1$, т. е. трансформатор на сердечнике *A* не имеет погрешности коэффициента трансформации, магнитный поток в сердечнике *B* равен нулю. Если же коэффициент трансформации не равен номинальному, т. е. ампервитки вторичные не равны ампервиткам первичным, в сердечнике *B* возникает магнитный поток, в компенсирующей обмотке индуцируется электродвижущая сила и, если обмотка замкнута на какое-либо сопротивление, проходит ток I'_2 . Число витков компенсирующей обмотки приблизительно равно числу витков главной, расположенной на обоих сердечниках, вторичной обмотки.

Питаемый этим трансформатором прибор должен иметь две обмотки; он работает от сумм двух вторичных токов: I_2 и I'_2 . Если обозначим через Δ_2 — погрешность тока I_2 и Δ'_2 — погрешность тока I'_2 , имеем:

$$k(I_2 + I'_2) = (1 + \Delta_2 \cdot \Delta'_2) \cdot I_1 = (1 + \Delta) \cdot I_1.$$

Таким образом прибор работает как бы от тока с погрешностью $\Delta = \Delta_2 \cdot \Delta'_2$.

При $\Delta_2 = 2\%$ и $\Delta'_2 = 10\%$

$$\Delta = \Delta_2 \cdot \Delta'_2 = 0,02 \cdot 0,1 \cdot 100 = 0,2\%$$

Для получения характеристики конструкции трансформатора с двумя сердечниками Бруксом и Гольцем был изготовлен трансформатор с коэффициентом трансформации 5/5. Этот трансформатор был исследован методом Эню при помощи двух образцовых счетчиков.

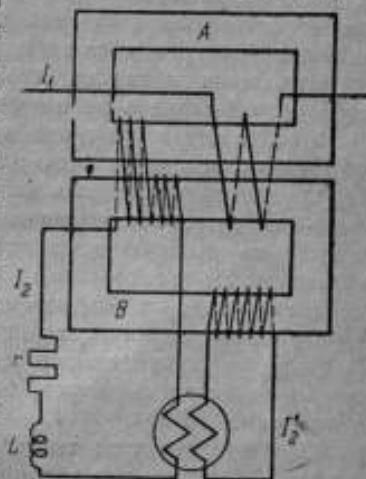


Рис. 1.

В виду того, что приборы, работающие с этими трансформаторами, должны иметь две обмотки, образцовые счетчики, применявшиеся для проверки, имели две токовых обмотки. Как известно, метод Эню при требовании большой точности отнимает очень много времени.

Результаты испытания³ показали, что погрешности коэффициента трансформации этого трансформатора не превышают $0,2\%$, а погрешность угла сдвига не превышает $5-10$ мин.

Проверку трансформаторов по Бруксу с другим коэффициентом трансформации Брукс и Гольц также производили сравнением друг с другом, по методу Эню, причем один из трансформаторов имел замыкающее сопротивление основной вторичной обмотки, отличающееся от другого и от замыкающего сопротивления второй обмотки.

Испытания показали, что и в этом случае погрешность коэффициента трансформации не превышает $0,2\%$.

Угол сдвига этого трансформатора, создаваемый обеими вторичными обмотками, и в этом случае также не превышает $5-10$ мин.

Трудность применения описанного трансформатора для схемы Шеринг-Альберти, заключающаяся в необходимости иметь два сопротивления, на которые замкнуты обе его вторичные обмотки, была разрешена доктором Арбергом (D-r Ahlberg) применением двух одинаковых сопротивлений, присоединяемых к обеим обмоткам трансформатора.

По схеме Арберга, трансформаторы по Бруксу, применяемые как образцовые трансформаторы при проверке трансформаторов тока на приборе Шеринг-Альберти, включаются совместно с известным сопротивлением.

Проверка отдельно трансформатора в виду особенности его схемы представляет большие затруднения. Поэтому Лаборатория переменного тока выработала способ проверки его совместно с его сопротивлениями. Поверяемый трансформатор включается так, как он включается в нормальной схеме Арберга, где он является образцовым трансформатором (см. схему рис. 2). На место, где в схеме Арберга включается проверяемый трансформатор тока, включается безиндукционный и беземкостный шунт, который и является эталоном для трансформатора по Бруксу.

Таким образом первичная обмотка трансформатора включается последовательно с образцовым шунтом, параллельно которому присоединено сопротивление R_w аппарата Шеринга, равное 100Ω . Сопротивление же R_1 , равное 200Ω , присоединяется параллельно к сопротивлениям $0,4 \Omega$, принадлежащим образцовому трансформатору.

Уравновешивание отклонения вибрационного гальванометра производится, как и в обычной схеме Шеринг-Альберти, перемещением контакта гальванометра на r_1 и изменением емкости присоединенного конденсатора. При равновесии ток в гальванометре отсутствует, и напряжение на r_1 равно напряжению на r_w . Для подсчета погрешности, вводимой в измерение трансформатором совместно с сопротивлениями, условно принимается существование приведенного шунта, номинальное значение сопротивления которого равно сопротивлению $0,4 \Omega$, деленному на номинальный коэффициент трансформации испытуемого трансформатора. Действительное значение этого условного сопротивления определяется из уравнения, аналогичного обычному уравнению Шеринг-Альберти.

Обозначим действительное значение условного шунта (как бы включенного последовательно с шунтом R) через R_x ; при равновесии имеем:

$$I_1 \cdot \frac{R \cdot R_w}{R + R_w} \cdot \frac{r_w}{R_w} = I_1 \cdot \frac{R_x \cdot R_1}{R_x + R_1} \cdot \frac{r_1}{R_1}$$

(значения R , R_1 , R_w , r_1 и r_w ясны из рисунка), откуда

$$R_x = \frac{R_1 R \cdot r_w}{R_w \cdot r_1 + R(r_1 - r_w)}. \quad (1)$$

Угол сдвига образцового трансформатора в минутах получается непосредственным отсчетом сотых долей микрофарда на конденсаторе.

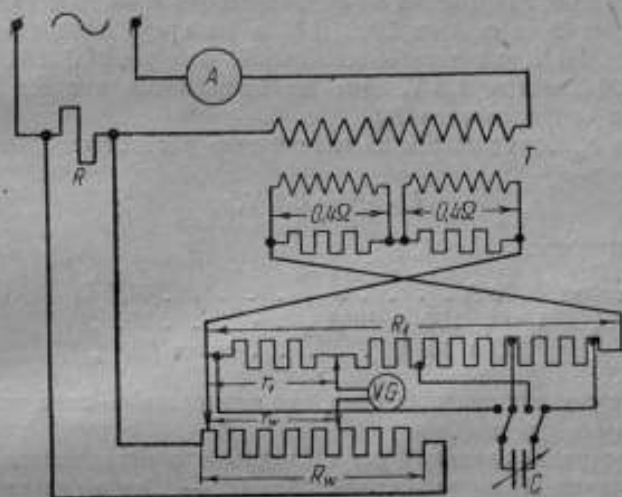


Рис. 2.

Необходимо заметить, что при переключателе конденсатора на положении $+$, т. е. при конденсаторе, присоединенном к сопротивлению r_w , угол сдвига δ поверяемого образцового трансформатора отрицателен.

При требовании большей точности определения величины R_x необходимо выяснить влияние того обстоятельства, что как сопротивление R_1 , так и сопротивление R_w присоединены соответственно параллельно сопротивлению $0,4 \Omega$ и шунту R при помощи проводов, активное сопротивление которых не равно нулю (реактивным сопротивлением проводов возможно пренебречь).

Обозначим через R'_w сопротивление R_w плюс сопротивление проводов и R'_1 сопротивление R_1 плюс сопротивление проводов. Тогда выражение для R_x примет вид:

$$R_x = \frac{R_1 R \cdot r_w \cdot R'_1 \cdot R'_w}{r_1 R_w \cdot R'_1 \cdot R'_w + R(r_1 R'_1 R_w - r_w \cdot R'_w \cdot R_1)} = \frac{R_1 \cdot R \cdot r_w}{r_1 R_w + R \cdot \left(r_1 \frac{R_w}{R_w} - r_w \cdot \frac{R'}{R} \right)} \quad (2)$$

при $R_w = R'_w$ и $R_1 = R'_1$ это выражение превращается в уравнение (1).

При проверке трансформатора по Бруксу на данный предел измерения обычно подбирается соответственное сопротивление шунта. Так например, при проверке трансформатора на 3000 А берется шунт на 3000 А сопротивлением 0,0004 Ω, при трансформаторе на 1000 А — шунт на 1000 сопротивлением 0,002 Ω и т. д.

Напряжение на зажимах сопротивлений 0,4 Ω, замыкающих образцовый трансформатор при токе I_1 , равном номинальному, и при коэффициенте трансформации, равном номинальному, обычно равно 2 V. Это же напряжение будет (приблизительно) и на сопротивлении $R_1 = 200$ Ω.

Следовательно, напряжение на сопротивлении $r_1 = 50$ Ω равно 0,5 V. Напряжение U на шунтах 1000, 100 и 10 А при номинальном токе также равно 2,0 V, на шунте же 3000 А оно равно 1,2 V, на шунтах 300 и 30 А равно 1,8 V. Это же напряжение имеется соответственно и на сопротивлении R_w .

Величина r_w определяется из следующего равенства:

$$U \cdot \frac{r_w}{R_w} = 0,5 \text{ V,}$$

откуда находим:

r_w для шунта 3000 А	41,5 Ω
r_w " " 1000, 100 и 10 А	25 "
r_w " " 300 и 30 А	около 25 "

(во всех этих случаях предположено, что номинальные силы тока шунта и трансформатора равны).

Из рассмотрения значений для r_w видно, что находящееся в знаменателе уравнения (1) выражение в скобке ($r_1 - r_w$) принимает значения от 8,5 до 25. При наибольшем значении R_1 равном 0,2 Ω (шунт на 10 А), весь второй член знаменателя $R(r_1 - r_w)$ не более $0,2 \cdot 25 = 5$.

В этом случае первый член знаменателя

$$R_w \cdot r_1 \approx 100 \cdot 50 = 5000,$$

и второй член представляет собой лишь 0,1% первого.

Отношения R_w/R'_w и R_1/R'_1 отличаются от единицы не более как на 0,2% и всегда одинакового знака, а следовательно и наибольшее влияние их на величину второго члена знаменателя не превысит 0,2% или влияние на все выражение не превысит $0,002 \cdot 0,001 = 0,000002$, т. е. 0,0002%.

В виду вышесказанного, поправки на сопротивления, включенные последовательно с R_1 и R_w , входящие во второй член знаменателя, не должны приниматься во внимание, и вычисление действительного значения R_x возможно производить по формуле (1).

Ниже приведены примеры испытаний образцового трансформатора вышеуказанным способом.

При подсчете R_x приняты во внимание все поправки на величины R_1 , R_w , r_w , r_1 и R .

В таблицах же указаны их номинальные значения.

В таблице 1 приведено испытание трансформатора, номинальный ток которого не равен номинальному току шунта и r_w найдено экспериментальным путем. Применяя вышеуказанную формулу для подсчета r_w , находим:

$$r_w = \frac{0,5 \cdot 100 \cdot 3000}{1,2 \cdot 2500} = 50 \Omega.$$

Таблица 1

Трансформатор Сименс и Гальске № 2479460 с сопротивлением № 2751391

$$\text{на } 2500\sqrt{5} \text{ A } R_{\text{шунт}} = 0,4 \cdot \frac{5}{2500} = 0,0008 \Omega.$$

I_1 в %	R	R_w	R_L	r_w	r_1	δ	R_x	$\frac{R_{\text{шунт}} - R_x}{R_x} \cdot 100$ в %
80	0,0004	100	200	50	50,175	-3'	0,0007962	+0,51
60					50,18	-3'	0,0007961	-0,51
40					50,19	-3'	0,0007959	-0,51
20					50,22	-3'	0,0007950	+0,56

Трансформатор Сименс и Гальске №2555788 с сопротивлением № 2751396,
 $R_{\text{шунт}}$ равно: 1) $0,4 \cdot 5/50 = 0,04 \Omega$. 2) $0,4 \cdot 5/100 = 0,02 \Omega$.

I_1 в %	R	R_w	R_L	r_w	r_1	δ	R_x	$\frac{R_{\text{шунт}} - R_x}{R_x} \cdot 100$ в %
--------------	-----	-------	-------	-------	-------	----------	-------	--

1. Соединение 50/5 A

100	0,02	100	200	50	49,82	+0',35	0,03999	+0,025
80					49,82	+0',35	0,03999	+0,025
60					49,815	+0',45	0,039995	+0,013
40					49,805	+0',50	0,04000	0
20					49,805	+0',50	0,04000	0
10					49,780	+0',60	0,04002	-0,050

2. Соединение 100/5 A

100	0,02	100	200	25	49,82	+0,4	0,019994	+0,03%
80					49,82	+0,4	0,019994	+0,03%
60					49,815	+0,45	0,019997	+0,01%
40					49,815	+0,5	0,019997	+0,014%
20					49,795	+0,5	0,020000	0
10					49,770	+0,6	0,02002	-0,1%

Точность вышеописанного метода испытания не превосходит точности моста Шерринг-Альберти в обычной его схеме, т. е. 0,1%, которая ограничивается точностью измерения сопротивлений, входящих в схему моста. Чувствительность же метода значительно выше гарантированной точности, почему в таблицах и даны значения R_x до четвертой и даже пятой значащей цифры. Для более полного исследования приведенного способа проверки было произведено сравнение двух образцовых трансформаторов (по Бруксу) на одну и ту же силу

тока (№ 2555804 и № 2555818). Были произведены предварительно проверка каждого из трансформаторов по шунту и затем сравнение их между собой. Для выяснения всех условий работы обоих трансформаторов проверка каждого трансформатора по шунту производилась двумя способами: один раз проверяемый трансформатор был включен так, как указано выше (рис. 2), а второй раз трансформатор был включен вместо шунта, тогда как шунт включался так, как он включается в нормальной схеме Шеринг-Альберти (рис. 3). Для подсчета приведенного сопротивления в этом случае применялась аналогичная формуле (2) нижеуказанная формула:

$$R_x = \frac{R \cdot R_w r_1}{r_w R_1 + R \left(r_w \frac{R_1}{R_1} - r_1 \frac{R_w}{R_w} \right)} \quad (3)$$

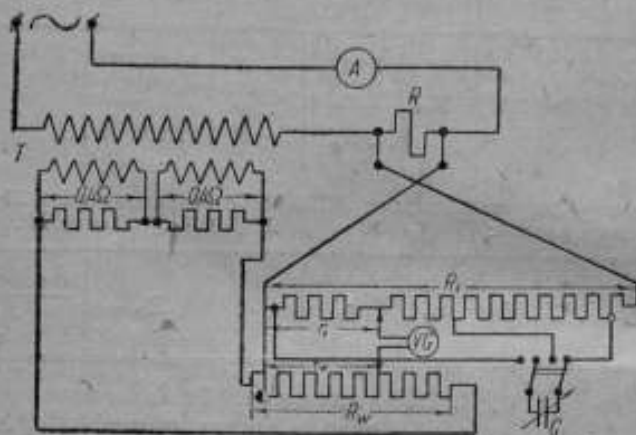


Рис. 3.

Так как при второй схеме сопротивление трансформатора (0,4 Ω) включается параллельно с сопротивлением R_w , это сопротивление в обоих случаях было взято равным R_1 , т. е. 200 Ω, и трансформатор всегда работал с одним и тем же замыкающим сопротивлением.

В таблице 2 приведены все результаты измерений при проверке трансформаторов как по первой схеме, так и по второй, а также и величины R_x и δ каждого трансформатора, определенные по второму трансформатору с соответствующими поправками. Как видно из рассмотрения таблицы, расхождения найденных величин — R_x не превосходят 0,025%, а величины δ , определенные всеми тремя способами, расходятся на 0,5 мин. Таким образом вышеуказанная точность измерения 0,1% является безусловно гарантированной, и точность измерения угла может быть принята, как и в нормальной схеме Шеринг-Альберти, равной 0,5 мин.

Конечно, для точных измерений погрешностей образцовых трансформаторов (класса 0,2) желательна разработка специальной схемы, дающей большую точность измерения, однако, для первого приближе-

ния приходится применять схему Шеринг-Альберти; ее возможно применять и для образцовых трансформаторов по Бруксу.

Таблица 2

Сила тока в % номин.	№ 2555804					
	1 схема		2 схема		По образцовому трансформатору № 2555818	
	N_x	δ	N_x	δ	N_x	δ
100	0,004007	-3,2	0,004008	-3,3	0,004007	-3,2
80	0,004007	-3,0	0,004008	-3,5	0,004007	-3,2
60	0,004007	-3,0	0,004009	-3,4	0,004008	-3,2
40	0,004007	-3,0	0,004008	-3,0	0,004008	-3,2
20	0,004008	-3,0	0,004010	-3,0	0,004009	-3,2

Сила тока в % номин.	№ 2555818					
	1 схема		2 схема		По образцовому трансформатору № 2555804	
	N_x	δ	N_x	δ	N_x	δ
100	0,004012	-1,8	0,004013	-2,3	0,004013	-2,0
80	0,004012	-1,8	0,004014	-2,3	0,004013	-1,8
60	0,004013	-1,8	0,004014	-2,3	0,004014	-1,8
40	0,004013	-1,8	0,004015	-2,3	0,004014	-1,8
20	0,004014	-2,0	0,004015	-2,5	0,004014	-2,0

V. Krotova

UNE MÉTHODE DE VERIFICATION DES TRANSFORMATEURS DE COURANT CONSTRUITS D'APRÈS LA MÉTHODE BROOKS

Résumé

On décrit une simple méthode de vérification des transformateurs de courant d'après Brooks en se servant de l'appareil de Schering-Alberti. Vu que le transformateur utilisé dans cet appareil est couplé avec une résistance de 0,4 ohm, on cherche l'erreur de mesure du transformateur avec cette résistance.

Plusieurs expériences effectuées pour comparer les résultats de vérification, on démontre que la précision de 0,1% est assurée.



ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Предисловие редактора	3
И. Н. Кротков. — Применение дифференциального гальванометра к измерению сопротивлений и определению температурных коэффициентов	4
А. А. Чечулин. — Влияние погрешности измерений на точность поверки индукционного счетчика	27
Н. А. Маренин. — Стробоскопический метод измерения технических частот	49
В. И. Кротова и С. В. Горбачевич. — Измерение частоты от 100 до 1000, Hz	70
А. А. Чечулин. — Точность стробоскопического метода измерения частоты	75
В. И. Кротова. — Способ поверки образцового трансформатора по Бруксу	83

TABLEAU DES MATIÈRES

I. Krotkov. L'emploi du galvanomètre différentiel dans la mesure des résistances et de la détermination des coefficients de température	26
A. A. Čeculin. L'influence de l'erreur des mesures sur la précision de la vérification d'un compteur d'induction	48
N. A. Marenin. Méthode normale de la mesure des fréquences techniques	69
V. I. Krotova et S. V. Gorbatsévitch. La mesure de fréquences de 100 à 1000 Hertz	75
A. A. Čeculin. La précision de la méthode stroboscopique de mesurer la fréquence	82
V. Krotova. Une méthode de vérification des transformateurs de courant construits d'après la méthode Brooks	89

Ответственный редактор *Н. А. Маренин*

Технический редактор *М. С. Рулева*

Корректор *А. В. Альтшулер*

Сдано в набор 5/III-39 г.

Подписано к печати 16/VII-39 г.

Тираж 600 экз.

Формат бумаги 60 × 92¹/₂

Уч.-изд. лист 6,62

Печ. лист 5¹/₂

Бум. лист 2¹/₂¹/₂

Кол-во печатных знаков в бум. листе 167 200

Индекс В-15-5-4

Заказ № 1401

Ленинград № 3699

p.

3

4

27

49

70

75

83

6

8

9

5

2

0

