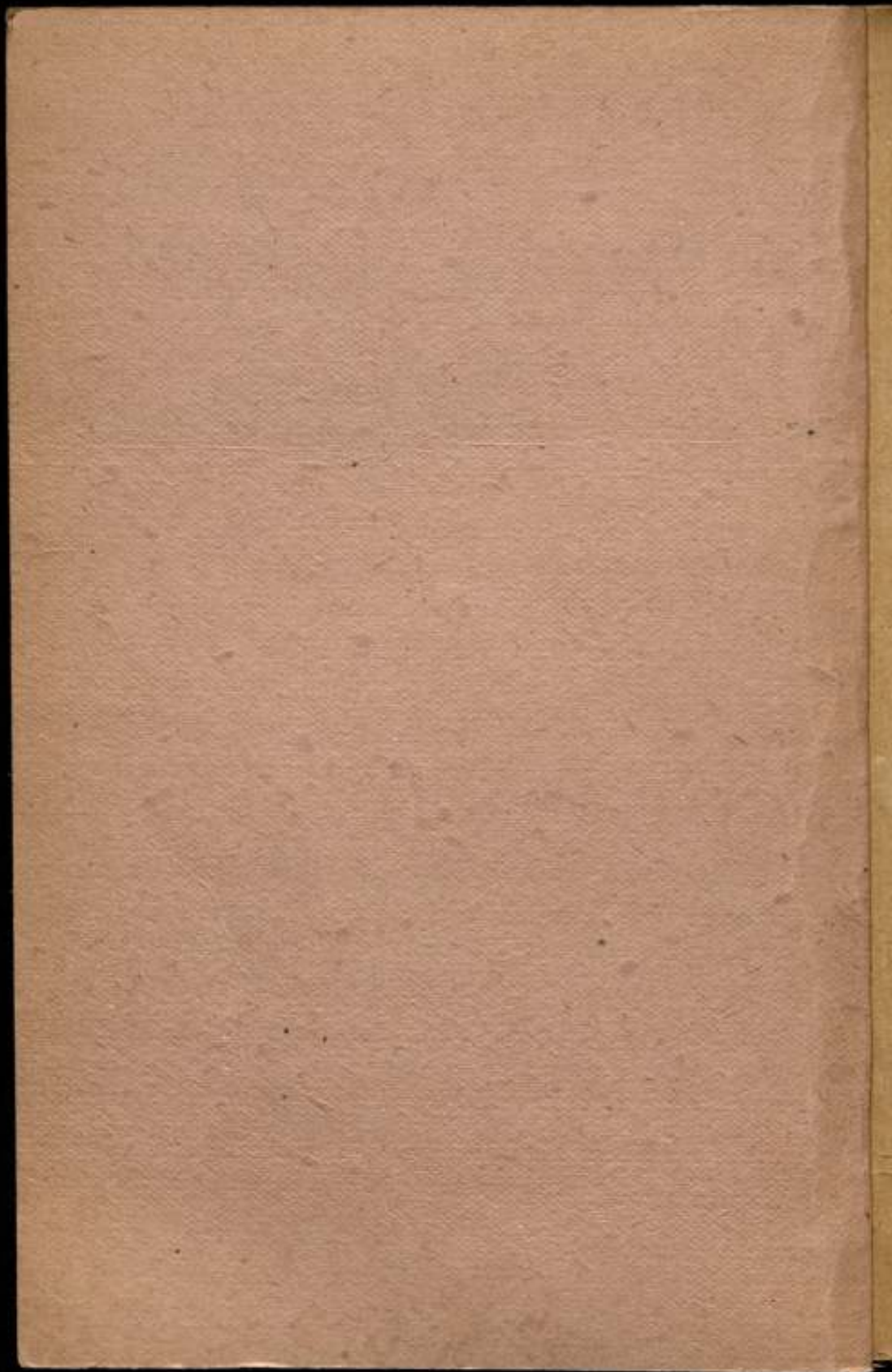


Электрические  
измерения

Выпуск 11(27)

1936<sub>2</sub>.



11(27)



TRAVAUX DE L'INSTITUT DE METROLOGIE ET  
DE STANDARDISATION DE L'U. R. S. S.

---

LIVRAISON 11 (27)

# MESURES ELECTRIQUES

Redacteur

*Prof. N. A. MARENIN*



---

EDITION DE L'ETAT POUR LA STANDARDISATION  
„STANDARTGIS“

LENINGRAD

1 9 3 6

MOSCOU

ТРУДЫ ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО  
ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ

ВЫПУСК 11 (27)

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

СБОРНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией  
проф. Н. А. МАРЕНИНА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ

„СТАНДАРТИЗ“

ЛЕНИНГРАД

1 9 3 6

МОСКВА

Главный ред. из-ва *М. М. Гиттерман*  
Техн. ред. *Р. Н. Мосевич*  
Ответственный ред. *С. Э. Снарский*  
Сдано в набор 19/VIII 1935 г. Подписано к печати 26/XII 1935 г.  
Формат 62 × 88. Объем 7<sup>3</sup>/<sub>4</sub> п. л. Бум. л. 3<sup>7</sup>/<sub>8</sub>. Печ. зн. в 1. л. 43776.  
Ленгорлит № 34565 Тираж 1300 экз. Заказ 1840.

Тип. „Коминтери“ и школа ФЗУ им. КИМ<sup>а</sup>, Ленинград, Красная ул. 1.

## ТЕОРИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ

Ф. Н. Николаев

### ВВЕДЕНИЕ

Измеряемая разность потенциалов на потенциометре, основанном на принципе Потендорфа, определяется из формулы:

$$U_x = I_k R_k \quad (1)$$

где  $I_k$  — сила тока в главной цепи потенциометра,  
 $R_k$  — значение сопротивления, входящего в цепь измеряемой разности потенциалов.

Сила тока  $I_k$  в главной цепи потенциометра связана с эдс нормального элемента следующей зависимостью:

$$I_k = \frac{E_N}{R_n} \quad (2)$$

где  $E_N$  — эдс нормального элемента,  
 $R_n$  — значение сопротивления, входящего в цепь нормального элемента.

Подставляя выражение для  $I_k$  из (2) в уравнение (1), имеем

$$U_x = E_N \frac{R_k}{R_n} \quad (3)$$

Это — основная формула, определяющая измеряемую разность потенциалов при измерении ее на потенциометре. Следовательно, чтобы знать неизвестную измеряемую разность потенциалов, вам необходимо знать величины  $E_N$ ,  $R_k$  и  $R_n$ . От точности определения величин  $E_N$ ,  $R_k$  и  $R_n$  зависит точность определения измеряемой величины  $U_x$ . Чтобы определить измеряемую величину  $U_x$  с заданной точностью, необходимо калибровать величины  $E_N$ ,  $R_k$  и  $R_n$  с достаточной для этого точностью, т. е. определить к ним поправки с такой точностью, чтобы погрешности определения этих поправок лежали за пределами заданной точности определения  $U_x$ .

В данной статье мы будем рассматривать несколько типов потенциометров и всюду будем предполагать, что поправки к величинам, от которых зависит измеряемая разность потенциалов, установлены и измерены. Совершенно не будем касаться вопроса, каким методом они определены. Вводя для каждого случая поправочный коэффициент будем считать, что все систематические погрешности в определении измеряемой разности потенциалов  $U_x$  устранены. Поэтому в дальнейших рассуждениях мы будем иметь дело исключительно со случайными погрешностями. При этом нас будет интересовать только порядок величин случайных погрешностей, а не сама величина их. Мы будем устанавливать предельную величину случайных погрешностей в определении величин, от которых зависит измеряемая разность потенциалов, исходя из заданной точности определения последней так, чтобы эта предельная величина случайных погрешностей лежала на пределе и не отражалась на заданную точность измерения  $U_x$ . Тогда мы можем утверждать, что точность определения величин или, что одно и то же, точность определения поправок к величинам, от которых зависит измеряемая величина  $U_x$  не должна быть менее  $\pm$  предельной величины случайных погрешностей соответствующих величин, т. е. поправки большие чем предельная величина соответствующих случайных погрешностей должны быть учтены, а поправки равные или меньшие чем соответствующие предельные случайные погрешности могут быть пренебрегаемы.

#### ПОТЕНЦИОМЕТРЫ РЕОХОРДНЫЕ

На основании выше изложенного предположим, что величины  $E_N$ ,  $R_k$  и  $R_n$  имеют поправки  $+x_N$ ,  $+x_k$  и  $+x_n$  соответственно. Тогда формула (3) переписывается в виде:

$$U_x = (E_N + x_N) \frac{R_k + x_k}{R_n + x_n}$$

После преобразования эта формула приближенно принимает вид:

$$U_x = E_N \frac{R_k}{R_n} \left( 1 + \frac{x_N}{E_N} + \frac{x_k}{R_k} - \frac{x_n}{R_n} \right) \quad (4)$$

где величины  $U_x$ ,  $E_N$ ,  $R_k$  и  $R_n$  действительные. Таким образом мы можем определить измеряемую величину  $U_x$  с нужной нам точностью, если нам известны в формуле (4) поправки  $x_N$ ,  $x_k$  и  $x_n$  с достаточной для этого точностью.

Обращаясь к формуле (3), мы можем заключить, что из трех величин, входящих в правую часть равенства, две величины можем выбрать так, чтобы погрешности их были возможно малы. В качестве произвольных величин выгодно принять величины  $R_n$  и  $E_N$ .

Большинство из реохордных потенциометров не имеют приспособления поправки на изменение эдс нормального элемента



от температуры. Величина  $R_n$  имеет только один предел. В таких потенциометрах величину  $R_n$  можем выбрать так, чтобы поправка в ней была равна нулю, т. е. за величину  $R_n$  можем принять число, полученное после измерений с достаточной точностью. Тогда в формуле (4) мы можем принять  $\alpha_n$  за нуль, и формула (4) примет вид:

$$U_x = E_N \frac{R_k}{R_n} \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k}{R_k} \right) \quad (5)$$

где  $R_n$  — величина, полученная после измерения с достаточной точностью.

Величину  $R_k$  мы выберем в соответствии с полученным результатом после поверки так, чтобы поправки  $\alpha_k$  были по возможности малы.

Выражение в скобках правой части уравнения (5) представляет собой поправочный коэффициент.

Для исследования вопроса, с какой точностью должны быть калиброваны величины, от которых зависит измеряемая величина, чтобы привносимые ими погрешности ничтожно влияли на точность измерения неизвестной величины, обратимся к закону накопления средних погрешностей, заключающемуся в следующем: если измеряемая величина  $y$  определяется на основании ряда отдельных измерительных операций над величинами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , произведенных со средними погрешностями, соответственно равными  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ , причем  $y$  связано с  $x_1, x_2, \dots, x_n$  равенством

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

то средняя погрешность  $s$  измерения величины  $y$  выражается формулой

$$s = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_n^2} \quad (6)$$

Формулой (6) мы можем воспользоваться для нашего случая, положив, что  $y = U_x$ , а  $x_1, x_2, \dots, x_n$  равны соответственно  $E_N, R_k$  и  $R_n$ .

В данном случае формулой (6) мы пользуемся не для определения величины  $s$ , а наоборот, величина  $s$  нам дана, а мы хотим определить средние погрешности величин  $E_N, R_k$  и  $R_n$ . Наша основная задача при этом заключается в том, чтобы определить, какого порядка погрешности величин  $E_N, R_k$  и  $R_n$  не отразятся на окончательном результате. Другими словами, определив порядок этих предельных поправок, мы узнаем, когда следует вносить эти поправки и вычислить поправочный коэффициент и когда не следует.

В нашем случае формула (6) принимает вид:

$$s = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial U_x}{\partial E_N}\right)^2 \sigma_N^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial R_k}\right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial R_n}\right)^2 \sigma_n^2} \quad (7)$$

где  $s$  — средняя погрешность, не влияющая на точность измеряемой величины,

$\sigma_N$ ,  $\sigma_k$  и  $\sigma_n$  — соответствующие погрешности величин  $E_N$ ,  $R_k$  и  $R_n$ .

Если мы обозначим через  $a \cdot 10^{-m}$  наименьшее число, которое возможно отсчитывать на потенциометре, то по крайней мере должно быть

$$s \leq \frac{a \cdot 10^{-m}}{2}. \quad (8)$$

На основании равенства (8) перепишем формулу (7) в виде:

$$\frac{a \cdot 10^{-m}}{2} \geq \left| \sqrt{\left(\frac{\partial U_x}{\partial E_N}\right)^2 \sigma_N^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial R_k}\right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial R_n}\right)^2 \sigma_n^2} \right| \quad (9)$$

Где знак  $||$  означает, что берется абсолютное значение.

Из формулы (3) мы имеем:

$$\frac{\partial U_x}{\partial E_N} = \frac{R_k}{R_n}, \quad \frac{\partial U_x}{\partial R_k} = \frac{E_N}{R_n}, \quad \frac{\partial U_x}{\partial R_n} = \frac{E_N R_k}{R_n^2}$$

Далее допустим, что все члены под радикалом равны между собой, тогда, принимая во внимание значение частных производных, получим:

или

$$\frac{a \cdot 10^{-m}}{2 \sqrt{3}} \geq \left| \sqrt{\left(\frac{R_k}{R_n}\right)^2 \sigma_N^2} = \frac{R_k}{R_n} \sigma_N \right| \quad (10)$$

или

$$\frac{a \cdot 10^{-m}}{2 \sqrt{3}} \geq \left| \sqrt{\left(\frac{E_N}{R_n}\right)^2 \sigma_k^2} = \frac{E_N}{R_n} \sigma_k \right| \quad (11)$$

или

$$\frac{a \cdot 10^{-m}}{2 \sqrt{3}} \geq \left| \sqrt{\left(\frac{E_N R_k}{R_n^2}\right)^2 \sigma_n^2} = \frac{E_N R_k}{R_n} \sigma_n \right| \quad (12)$$

Из равенства (10) имеем:

$$\sigma_N \leq \left| \frac{a \cdot 10^{-m} R_n}{2 \sqrt{3} R_k} = \frac{a \cdot 10^{-m} E_N}{2 \sqrt{3} U_k} = \frac{a \cdot 10^{-m} E_N}{2 \sqrt{3} A \cdot 10^{-n}} \right| \quad (13)$$

Из равенства (11) имеем:

$$\sigma_k \leq \left| \frac{a \cdot 10^{-m} R_n}{2 \sqrt{3} E_N} = \frac{a \cdot 10^{-m} R_k}{2 \sqrt{3} U_k} = \frac{a \cdot 10^{-m} R_k}{2 \sqrt{3} A \cdot 10^{-n}} = \frac{a \cdot 10^{-m}}{2 \sqrt{3} I_k} \right| \quad (14)$$

Из равенства (12) имеем:

$$\sigma_n \leq \left| \frac{a \cdot 10^{-m} R_n^2}{2\sqrt{3} E_N R_k} = \frac{a \cdot 10^{-m} R_n}{2\sqrt{3} U_k} = \frac{a \cdot 10^{-m} R_n}{2\sqrt{3} A \cdot 10^{-n}} \right| \quad (15)$$

где  $A \cdot 10^{-n}$  — наибольшее число, которое возможно отсчитывать на потенциометре (введено в формулы потому, что наибольшая погрешность получается при наибольшем показании потенциометра).

Рассмотрим применение выведенных выше формул, причем в качестве примера возьмем материалы поверки реохордного потенциометра Института металлов.

Выше уже было сказано, что за величину  $R_n$  мы можем брать величину, полученную после измерения, следовательно за поправку к  $R_n$  выбираем нуль. Точность, с какой мы должны измерять  $R_n$ , мы определим из формулы (15).

Данный потенциометр позволяет измерить разность потенциалов до 90 милливольт. Самое меньшее можно отсчитывать до 0,025 милливольт, соответствующее половине наименьшего деления на реохорде. Следовательно в нашем случае

$$a \cdot 10^{-m} = 0,000025 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ вольт}$$

$$A \cdot 10^{-n} = 0,090 = 9 \cdot 10^{-2}$$

Для  $R_n$  после измерения получено значение, равное

$$R_n = 48,5683 \text{ ома.}$$

Подставляя эти численные значения в формулу (15), имеем:

$$\sigma_n \leq 48,5683 \frac{2,5}{2 \cdot 9 \cdot \sqrt{3}} 10^{2-5} = 0,004 \text{ ома.}$$

Таким образом, мы можем считать  $R_n$  равным 48,570 и погрешность к нему можем считать равной нулю (при этом допускаем ошибку, лежащую за пределами нашей точности).

Для отдельных катушек декады и реохорда после измерения получены следующие значения сопротивлений в омах:

№ № катушек	Сопротивление в омах	От—до	Сопротивление в омах
I	0,717	0 — I	0,717
II	0,715	0 — II	1,432
III	0,716	0 — III	2,148
IV	0,716	0 — IV	2,864
V	0,716	0 — V	3,580
общее сопротивление реохорда	0,716	0 — 15 V — 15	0,716 4,296

Из формулы (14) определим точность, с какой мы должны измерить сопротивление  $R_k$ . Подставляя численные значения в формулу (14), получаем:

$$\sigma_k \leq 4,296 \frac{2,5}{2,9 \cdot \sqrt{3}} 10^{-5} = 0,0003 \text{ ома.}$$

Следовательно, чтобы получить измеряемое падение напряжения на данном потенциометре с точностью до 0,000025 вольт, мы должны знать, т. е. измерить отдельные катушки декады, а также части реохорда с точностью до 0,0003 ома. В нашем случае, как это видно из таблицы, мы сделали некоторое отступление от только что сказанного, измеряя сопротивления до 0,001 ома. Это мы сделали потому, что на данном потенциометре хотя и можно отсчитывать до половины наименьшего деления реохорда, что соответствует 0,000025 вольтам, но такой отсчет не является точным ввиду непостоянства подвижного контакта на реохорде, так что брать точность поверки данного потенциометра выше, чем это мы делали, было бы бесплезно. Итак, мы можем измерить разность потенциалов на данном потенциометре с точностью не выше  $7,5 \cdot 10^{-5}$  вольта, т. е. с точностью до 1,5 наименьшего деления.

Как видно из таблицы, наивыгоднейшим значением полного сопротивления в цепи измеряемого падения напряжения (сопротивление, соответствующее 90 милливольтам) является:

$$R_k = 4,296 \text{ ома.}$$

Исходя из этого значения  $R_k$ , можем определить сопротивление, соответствующее какой угодно разности потенциалов. Например, сопротивление катушки каждой в отдельности должно быть равно 0,716 ома. Сопротивление части реохорда, соответствующей одному милливольту, должно быть равно 0,0477 ома.

Отклонения от этих величин и будут представлять собою поправку той или иной части сопротивления, участвующего при измерении разности потенциалов. На основании только что сказанного можем определить поправки.

Сопротивления декады

Показания потенциометра	Действительное значение в омах	Поправки в омах
от—до		
0 — I	0,717	+ 0,001
0 — II	1,432	0
0 — III	2,148	0
0 — IV	2,864	0
0 — V	3,580	0

Сопротивления реохорда

0 — 1	0,050	+ 0,002
0 — 2	0,095	
0 — 3	0,143	0
0 — 4	0,189	- 0,001
0 — 5	0,237	- 0,001
0 — 6	0,285	- 0,001
0 — 7	0,333	- 0,001
0 — 8	0,381	- 0,001
0 — 9	0,429	0
0 — 10	0,477	0
0 — 11	0,524	- 0,001
0 — 12	0,572	0
0 — 13	0,619	- 0,001
0 — 14	0,668	0
0 — 15	0,716	0

После того, как мы выбрали две величины, третью величину найдем из формулы (3), а именно:

$$E_N = \frac{U_k R_n}{R_0} = \frac{0,090 \cdot 48,570}{4,2 \cdot 6} = 1,01753 \text{ вольта.}$$

Максимальную точность, с какой мы должны определить  $E_N$ , найдем из формулы (13), именно:

$$\sigma_N \leq \frac{a \cdot 10^{n-m} E_N}{2 \sqrt{3} A} = \frac{2,5 \cdot 1,017}{2 \cdot 9 \cdot \sqrt{3}} 10^{2-5} = 0,00008 \text{ вольта.}$$

Следовательно  $E_N$  можем принять равным 1,0175. Таким образом  $E_N$  мы должны определить с точностью не выше 0,00008 вольта.

Итак, для исправления измеряемой разности потенциалов мы должны пользоваться формулой (5):

$$U_x = \frac{E_N R_k}{R_n} \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k}{R_k} \right) = U_k \left( 1 + \frac{0,02095 (\alpha_{kE} + \alpha_{kR})}{U_k} + \frac{\alpha_N}{1,0175} \right),$$

где:

$\alpha_{kE}$  — поправка к катушкам декады,

$\alpha_{kR}$  — " к реохорду,

$\alpha_N$  — вычисляется из формулы

$$E_{Ni} - 1,0175 = \alpha_N$$

Для измерения разности потенциалов на потенциометре имеем формулу (2)

$$U_x = \frac{E_N}{R_N} R_k$$

Для случая, если величины  $E_N$ ,  $R_N$  и  $R_k$  имеют поправки  $\alpha_N$ ,  $\alpha_N$  и  $\alpha_k$  соответственно, имеем выражение (4).

Выражение (4) справедливо в том случае, если полное сопротивление потенциометра при передвижении контактных рычагов не меняется.

В потенциометре типа Фейснера фирмы Вольф полное сопротивление  $R_0$  от передвижения контактных рычагов может изменяться поэтому, чтобы учесть погрешность измерения разности потенциалов, обусловленную изменениями полного сопротивления потенциометра, мы должны как-то ввести в уравнение (4) эту величину.

Величину  $R_0$  мы можем ввести в уравнение (4) из следующих соображений:

В уравнении (4) отношение  $E_N/R_N$  представляет собой не что иное, как силу тока  $I_k$  в цепи потенциометра. От изменения полного сопротивления  $R_0$  потенциометра эта сила тока  $I_k$  изменится, но при этом ни  $E_N$  ни  $R_N$  и ни  $R_k$  не изменятся, следовательно и выражение в скобках в правой части равенства (4) не изменится. Таким образом, выражая силу тока  $I_k$ , равную отношению  $E_N/R_N$ , через сопротивление  $R_0$  и подаваемое напряжение  $E_0$  на зажимы „В“ потенциометра по формуле:

$$I_k = \frac{E_0}{R_0} \quad (1)$$

и заменяя в уравнении (4) отношение  $E_N/R_N$  равным ему отношению из (16), будем иметь вместо (4)

$$U_x = \frac{E_0}{R_0} R_k \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k}{R_k} + \frac{\alpha_N}{R_N} \right) \quad (1)$$

На основании сказанного выше в уравнении (17) можно считать переменной только величину  $R_0$  (величина  $E_0$  — напряжение на зажимах „В“ потенциометра — от  $R_0$  не зависит).

Далее, вводя поправку к  $R_0$  в уравнении (17) и обозначив ее через  $\alpha_0$ , имеем:

$$U_x = \frac{E_0 R_k}{R_0 + \alpha_0} \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k}{R_k} + \frac{\alpha_N}{R_N} \right)$$

или после преобразования получаем приближенно

$$U_x = \frac{E_0 R_k}{R_0} \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k}{R_k} - \frac{\alpha_n}{R_n} - \frac{\alpha_0}{R_0} \right)$$

или окончательно

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k}{R_k} - \frac{\alpha_n}{R_n} - \frac{\alpha_0}{R_0} \right) \quad (18)$$

Выражение в скобках в правой части формулы (18) будет представлять собой поправочный коэффициент для потенциометров типа Фейснера.

Теперь выясним влияние погрешностей  $\alpha_N, \alpha_n, \alpha_k$  и  $\alpha_0$  на точность измерения. Для этого мы воспользуемся формулой (6) и аналогично выражению (9) напишем:

$$\frac{a \cdot 10^{-m}}{2} \geq \sqrt{\left(\frac{\partial U_x}{\partial E_N}\right)^2 \sigma_N^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial R_k}\right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial R_n}\right)^2 \sigma_n^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial R_0}\right)^2 \sigma_0^2} \quad (19)$$

Допуская, что все члены под радикалом равны между собой раскрывая частные производные аналогично выражениям (13), (14) и (15), имеем:

$$\sigma_N \leq \frac{a \cdot 10^{-m} E_N}{4 A \cdot 10^{-n}} \quad (20)$$

$$\sigma_k \leq \frac{a \cdot 10^{-m}}{4 I_k} \quad (21)$$

$$\sigma_n \leq \frac{a \cdot 10^{-m} R_n}{4 A \cdot 10^{-n}} \quad (22)$$

$$\sigma_0 \leq \frac{a \cdot 10^{-m} R_0}{4 A \cdot 10^{-n}} \quad (23)$$

Следовательно, если поправки  $\alpha_N, \alpha_k, \alpha_n$  и  $\alpha_0$  по своей абсолютной величине не превышают величин  $\sigma_N, \sigma_k, \sigma_n$  и  $\sigma_0$ , выраженных уравнениями (20), (21), (22) и (23), то этими поправками мы могли бы пренебречь, в противном случае мы их должны учесть.

Применим теперь вышеизложенное к потенциометру типа Фейснера фирмы Вольф № 7162. Общее сопротивление 15000 ом, с декадами:  $14 \times 1000, 9 \times 100, 9 \times 10, 9 \times 1$  и  $9 \times 0,1$ , сила

тока в главной цепи равна 0,0001 ампера. Наименьшее возможное показание соответствует 0,00001 вольт, наибольшее показание — 1,5 вольт.

Подставляя численные значения в формулы (20), (21), (22) (23), имеем соответственно:

$$\sigma_N < \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0190}{4 \cdot 15 \cdot 10^{-1}} = 0,0000017 \text{ вольт.}$$

$$\sigma_R < \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 10000}{4 \cdot 1} = \pm 0,025 \text{ ома.}$$

$$\sigma_n < \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 15000}{4 \cdot 15 \cdot 10^{-1}} = \pm 0,017 \text{ ома.}$$

$$\sigma_0 < \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 15000}{4 \cdot 15 \cdot 10^{-1}} = \pm 0,025 \text{ ома.}$$

Следовательно, при проверке потенциометров указанного типа должны измерить сопротивления  $R_k$  и  $R_0$  по крайней мере с точностью до  $\pm 0,025$  ома; сопротивления  $R_n$  должны измерить с точностью до  $\pm 0,017$  ома и знать эдс нормального элемента с точностью до  $\pm 0,0000017$  вольт.

Контактные сопротивления потенциометров указанного типа обычно меньше 0,02 ома, потому ими вполне можно пренебречь.

Следует обратить внимание еще на то обстоятельство, что величина  $R_k$  состоит из пяти членов (число декад), т. е.

$$R_k = R_k^I + R_k^{II} + R_k^{III} + R_k^{IV} + R_k^V$$

Если точность определения этой суммы равна  $\pm 0,025$ , то точность определения каждой из величин  $R_k$  должна быть больше. Пользуясь тем же законом накопления ошибок, найдем, что

$$\sigma_k^i = \frac{0,025}{\sqrt{5}} = \pm 0,011 \text{ ома,}$$

где  $\sigma_k^i$  — средняя ошибка к величинам  $R_k^i$

$$i = I, II, III, IV, V.$$

В свою очередь первая декада состоит из 14 катушек, а остальные декады состоят из 9 катушек каждая. Следовательно, каждая катушка первой декады должна быть измерена с точностью

$$\sigma_{kj}^i = \frac{0,011}{\sqrt{14}} = \pm 0,003 \text{ ома; } j = 1, 2, \dots, 14;$$



каждая катушка остальных декад должна быть измерена с точностью

$$\sigma_{k_j}^i \leq \frac{0,011}{\sqrt{9}} = 0,0037 \text{ ома} \quad \begin{matrix} i = \text{II, III, IV, V} \\ j = 1, 2 \dots 9 \end{matrix}$$

Указанное относится к тому случаю, когда каждая катушка отдельных декад измерена отдельно. Если пользоваться при проверке потенциометров методами, позволяющими не повторять систематических ошибок, то достаточно ранее выведенная точность определения  $R_{к}$ , т. е. 0,025 ома.

При проверке вышеуказанного потенциометра, после некоторой обработки получены следующие результаты:

Декада $\times 1000$		Декада $\times 100$		Декада $\times 10$		Декада $\times 1$	
от—до	в омах	от—до	в омах	от—до	в омах	от—до	в омах
0—1	999,98	0—1	100,00	0—1	10,00	0—1	1,00
0—2	2000,04	0—2	199,98	0—2	20,00	0—2	2,00
0—3	3000,12	0—3	299,98	0—3	30,00	0—3	3,00
0—4	4000,20	0—4	399,98	0—4	40,00	0—4	4,00
0—5	5000,28	0—5	499,96	0—5	50,00	0—5	5,00
0—6	6000,36	0—6	599,94	0—6	60,00	0—6	6,00
0—7	7000,42	0—7	699,92	0—7	70,00	0—7	7,00
0—8	8000,48	0—8	799,92	0—8	80,00	0—8	8,00
0—9	9000,54	0—9	899,92	0—9	90,00	0—9	9,00
0—10	10000,60						
0—11	11000,68						
0—12	12000,76						
0—13	13000,84						
0—14	14000,90						

Декада $> 0,1$		Термокомпенсационная декада нормального элемента	
от—до	в омах	от—до	в омах
0—1	0,10	180—0	180,00
0—2	0,20	—1	181,00
0—3	0,30	—2	182,00
0—4	0,40	—3	183,00
0—5	0,50	—4	184,00
0—6	0,60	—5	185,00
0—7	0,70	—6	186,00
0—8	0,80	—7	187,00
0—9	0,90	—8	188,00
		—9	189,00
		—10	190,00

Все результаты округлены до  $\pm 0,02$  ома.

Цепь нормального элемента состоит из катушек 2, 3 . . . 1 и некоторой части первой катушки декады  $\times 1000$ . Сумма — общее сопротивление цепи нормального элемента — равна  $11000,68 - 999,98 + 190 = 10190,70$  ома. Пользуясь тем, что в уравнении (3) две величины можем выбрать произвольно, выберем сопротивление в цепи нормального элемента произвольно так, чтобы оно равнялось не 10190,70 омам, а было точно 10190,00 ом, и изменим соответственно систему исчисления единиц (переменным соответственно масштаб). Для этого умножим весь полученный результат на 10190,00 и разделим на 10190,70, тогда будем иметь

Декада $\times 1000$		Декада $\times 100$	
от—до	в омах	от—до	в омах
0—1	999,92	0—1	100,00
0—2	1999,80	0—2	199,96
0—3	2999,70	0—3	299,96
0—4	3999,64	0—4	399,96
0—5	4999,64	0—5	499,92
0—6	5999,64	0—6	599,90
0—7	6999,64	0—7	699,88
0—8	7999,64	0—8	799,86
0—9	8999,62	0—9	899,86
0—10	9999,62		
0—11	10999,62		
0—12	11999,64		
0—13	12999,64		
0—14	13999,64		

Декады  $\times 10$ ,  $\times 1$ ,  $\times 0,1$  и термокомпенсационная декада остаются неизменными.

Для исправления (т. е. для введения поправок) измеряемой величины мы имеем формулу (18)

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k}{R_k} - \frac{\alpha_R}{R_R} - \frac{\alpha_0}{R_0} \right),$$

которую перепишем в удобном для пользования виде:

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k^I + \alpha_k^{II} + \alpha_k^{III} + \alpha_k^{IV} + \alpha_k^V}{10000 U_k} - \frac{\alpha_R}{R_R} - \frac{\alpha_0}{R_0} \right)$$

В нашем случае поправки  $\alpha_k^{III}$ ,  $\alpha_k^{IV}$ ,  $\alpha_k^V$ ,  $\alpha_R$  и  $\alpha_0$  равны нулю (изменение общего сопротивления от передвижения рычагов меньше чем 0,025 ома), следовательно для данного потенциометра мы имеем формулу

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_k^I + \alpha_k^{II}}{10000 U_k} \right).$$

где  $U_h$  — показания потенциометра,  
 $\alpha_h^I$  — поправки, относящиеся к декаде  $\times 1000$ ,  
 $\alpha_h^{II}$  — поправки, относящиеся к декаде  $\times 100$ ,  
 $\alpha_N$  — определяется из уравнения

$$E_{N_{св}} - E_{N_{ном}} = \alpha_N,$$

где  $E_{N_{св}}$  — значение эдс нормального элемента, данное в свидетельстве,

$E_{N_{ном}}$  — значение эдс нормального элемента, которое учитывает потенциометр.



### ПОТЕНЦИОМЕТР ТИПА БРУГГЕР ФИРМЫ ГАРТМАН БРАУН

Для введения поправки к измеряемой разности потенциалов на потенциометре Бруггера, как и на потенциометре Фейснера, имеем формулу

$$U_x = U_h \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_h}{R_h} - \frac{\alpha_n}{R_n} - \frac{\alpha_0}{R_0} \right)$$

Как мы видели при измерении разности потенциалов на потенциометре Фейснера, поправки  $\alpha_N$ ,  $\alpha_n$  и  $\alpha_0$  состояли из одного члена, поправки  $\alpha_h$  состояли из столько же членов, сколько деkad имеет потенциометр. Для потенциометра Бруггера, ввиду его особенного устройства, выражение в скобках усложняется.

Найдем сначала выражение для  $\alpha_0$ . Общее сопротивление потенциометра Бруггера, так же как и Фейснера, от передвижения рычагов, может измениться. Но это изменение здесь гораздо сложнее. Изменение сопротивления одной декады при неизменности сопротивлений других деkad вызывает изменение сопротивления последних, и наоборот; для выяснения зависимости этих изменений примем во внимание, что сопротивление пятой, как и первой декады от передвижения рычагов не изменяется. Но общее сопротивление декады 5 и сопротивления, параллельно которому включаются декады № 5, при передвижении рычагов № 4 может измениться, вследствие чего сопротивление четвертой декады не постоянно. Если обозначим общее сопротивление четвертой декады через  $R_4$ , сопротивление той же декады за исключением сопротивлений двух катушек, параллельно которым включается четвертая декада, через  $R_{24}$ , сопротивления этих двух катушек через  $r'_4$  и сопротивление пятой декады через  $R_5$ , то можем написать

$$R_4 = R_{24} + \frac{r'_4 R_5}{r'_4 + R_5}$$

Аналогичным рассуждением можем получить для третьей декады

$$R_3 = R_{23} + \frac{r'_3 R_4}{r'_3 + R_4}$$

Для любой декады имеем

$$R_{i-k} = R_{S_{i-k}} + \frac{r'_{i-k} \cdot R_{i-(k-1)}}{r'_{i-k} + R_{i-(k-1)}}, \quad (24)$$

где  $i$  равно номеру последней декады,  $k=1, 2, \dots$

Изменение общего сопротивления  $R_{i-k}$  декады ( $i-k$ ) зависит от изменения двух величин  $r'_{i-k}$  и  $R_{i-(k-1)}$ . Потому получаем это изменение по формуле

$$\Delta R_{i-k} = \frac{r'^2_{i-k} \Delta R_{i-(k-1)} + R^2_{i-(k-1)} \Delta r'_{i-k}}{(r'_{i-k} + R_{i-(k-1)})^2} \quad (25)$$

В нашем случае потенциометр Бруггера имеет 5 декад, следовательно  $i=5$ .

Для изменения второй декады мы получаем выражение из (25) (первая декада от передвижения рычагов не меняется):

$$\Delta R_2 = \frac{r'^2_2 \Delta R_3 + R^2_3 \Delta r'_2}{(r'_2 + R_3)^2} \quad (26a)$$

Изменение третьей декады выразится формулой:

$$\Delta R_3 = \frac{r'^2_3 \Delta R_4 + R^2_4 \Delta r'_3}{(r'_3 + R_4)^2} \quad (26b)$$

и изменение четвертой декады выразится формулой

$$\Delta R_4 = \frac{r'^2_4 \Delta R_5 + R^2_5 \Delta r'_4}{(r'_4 + R_5)^2} \quad (26c)$$

Пятая декада, как мы уже упоминали, от передвижения рычагов не меняется.

Первая декада данного потенциометра Бруггера состоит из 10 катушек по 1000 ом.

Вторая декада состоит из 11 катушек по 100 ом.

Третья " " " " " " " " " " " 20 " "

Четвертая декада состоит из 11 катушек по 4 ома и

пятая декада состоит из 10 катушек по 0,8 ома.

Каждая последующая декада приключена к предшествующей декаде параллельно к двум катушкам, следовательно каждая  $r'$  состоит из двух катушек соответствующего сопротивления.

Подставляя численные значения в формулы (26a), (26b) (26c), получаем:

$$\Delta R_2 = \frac{200^2 \Delta R_3 + 200^2 \Delta r'_2}{(200 + 200)^2} = \frac{1}{4} (\Delta R_3 + \Delta r'_2) \quad (27a)$$

$$\Delta R_3 = \frac{40^2 \Delta R_3 + 40^2 \Delta r_3'}{(40 + 40)^2} = \frac{1}{4} (\Delta R_3 + \Delta r_3') \quad (27b)$$

$$\Delta R_4 = \frac{8^2 \Delta R_4 + 8^2 \Delta r_4'}{(8 + 8)^2} = \frac{1}{4} (\Delta R_4 + \Delta r_4') \quad (27c)$$

Так как  $R_5$  от передвижения последнего рычага не изменяется, то  $\Delta R_5 = 0$ , следовательно вместо выражения (27c) имеем:

$$\Delta R_4 = \frac{1}{4} \Delta r_4' \quad (28)$$

Подставляя это выражение для  $\Delta R_4$  в выражение (27b), имеем:

$$\Delta R_3 = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{4} \Delta r_4' + \Delta r_3' \right) = \frac{1}{16} \Delta r_4' + \frac{1}{4} \Delta r_3'$$

Подставляя это выражение для  $\Delta R_3$  в выражение (27a), имеем:

$$\Delta R_2 = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{16} \Delta r_4' + \frac{1}{4} \Delta r_3' + \Delta r_2' \right) \quad (29)$$

Таким образом изменение сопротивлений декад 5, 4 и 3 от передвижения рычагов мы свели к изменению сопротивления второй декады, выразив последнее через изменения сопротивлений упомянутых декад формулой (29). Сопротивление первой декады от передвижения рычагов не меняется. Следовательно мы можем заключить, что полное сопротивление потенциометра Бруггера может измениться исключительно ввиду изменения общего сопротивления второй декады. Потому относительную поправку к полному сопротивлению потенциометра Бруггера мы можем выразить формулой:

$$\frac{\alpha_0}{R_0} = \frac{1}{4R_0} \left( \frac{1}{16} \Delta r_4' + \frac{1}{4} \Delta r_3' + \Delta r_2' \right) \quad (30)$$

Далее выведем выражение для поправки  $\alpha_k$  к сопротивлению, отсчитываемому на потенциометре соответственно показаниям рычагов. Потенциометр Бруггера отличается от потенциометра Вольфа тем, что на Бруггере неизвестная разность потенциалов компенсируется падением напряжения на нескольких участках цепи, по которым проходят различные токи, так что

$$U_x = I_0 (R_1' + R_2') + I_3 R_3' + I_4 R_4' + I_5 R_5' \quad (31)$$

где  $I_0$ —сила тока, устанавливаемая в главной цепи потенциометра и равная в нашем случае 0,0001 ампера,  
 $R_1', R_2', \dots, R_5'$ —сопротивления, показываемые на декадах соответствующими рычагами,  
 $I_3, I_4$  и  $I_5$ —токи, проходящие по декадам 3, 4 и 5.

Исключим из уравнения (31) силы токов  $I_3$ ,  $I_4$  и  $I_5$  следующим образом.

Сначала исключим силу тока  $I_5$ .

По законам Кирхгофа мы имеем:

$$I_4 = i_4 + I_5$$

$$i_4 r_4' = I_5 R_5$$

где  $i_4$  — сила тока, проходящего по сопротивлению, параллельному которому включается сопротивление  $R_5$  декады пятой. Исключая из уравнений (32) и (33) силу тока  $i_4$ , имеем:

$$I_5 = I_4 \frac{r_4'}{R_5 + r_4'} \quad (34)$$

Аналогичным рассуждением получим для  $I_4$  и  $I_3$  выражения

$$I_4 = I_3 \frac{r_3'}{R_4 + r_3'} \quad (35)$$

$$I_3 = I_0 \frac{r_2'}{R_3 + r_2'} \quad (36)$$

Подставляя в выражении (35) вместо  $I_4$  его значение из (36) имеем:

$$I_4 = I_0 \frac{r_2' r_3'}{(R_3 + r_2')(R_4 + r_3')} \quad (37)$$

Подставляя в выражении (34) вместо  $I_4$  его значение из выражения (37), имеем:

$$I_5 = I_0 \frac{r_2' r_3' r_4'}{(R_3 + r_2')(R_4 + r_3')(R_5 + r_4')} \quad (38)$$

Заменяя в уравнении (31) величины  $I_3$ ,  $I_4$  и  $I_5$  их значения из (36), (37) и (38), будем иметь:

$$U_x = I_0 \left[ R_1' + R_2' + R_3' \frac{r_2'}{R_3 + r_2'} + R_4' \frac{r_2' r_3'}{(R_3 + r_2')(R_4 + r_3')} + R_5' \frac{r_2' r_3' r_4'}{(R_3 + r_2')(R_4 + r_3')(R_5 + r_4')} \right] \quad (39)$$

Выражение в скобках уравнения (39) не что иное, как общее сопротивление  $R_h$  потенциометра, на котором компенсируется измеряемая разность потенциалов  $U_x$ , т. е.

$$R_h = R_1' + R_2' + R_3' \frac{r_2'}{R_3 + r_2'} + R_4' \frac{r_2' r_3'}{(R_3 + r_2')(R_4 + r_3')} + R_5' \frac{r_2' r_3' r_4'}{(R_3 + r_2')(R_4 + r_3')(R_5 + r_4')} \quad (40)$$

или, подставляя численные величины вместо  $r_2'$ ,  $r_3'$ ,  $r_4'$ ,  $R_3$  и  $R_5$ , имеем:

$$R_h = R_1' + R_2' + \frac{1}{2} R_3' + \frac{1}{4} R_4' + \frac{1}{8} R_5' \quad (41)$$

Поправка  $\alpha_k$  к величине  $R_k$  в данном случае будет состоять из поправок ко всем величинам, входящим в выражение (39). Обозначая поправки к величинам  $R_1', R_2', R_3', R_4'$  и  $R_5'$  соответственно через  $\alpha_1', \alpha_2', \alpha_3', \alpha_4'$  и  $\alpha_5'$ , поправки к величинам  $R_0, R_1$  и  $R_2$  соответственно через  $\alpha_0, \alpha_1$  и  $\alpha_2$  и поправки к величинам  $r_2', r_3'$  и  $r_4'$  соответственно через  $\beta^{II}, \beta^{III}, \beta^{IV}$ , будем иметь вместо уравнения (39)

$$U_x = I_0 [R_1' + \alpha_1' + R_2' + \alpha_2' + (R_3' + \alpha_3') \frac{r_2' + \beta_2}{R_3 + r_2' + \alpha_3 + \beta_3} + (R_4' + \alpha_4') \frac{(r_2' + \beta_2)(r_3' + \beta_3)}{(R_3 + r_2' + \alpha_3 + \beta_3)(R_4 + r_3' + \alpha_4 + \beta_4)} + (R_5' + \alpha_5') \frac{(r_2' + \beta_2)(r_3' + \beta_3)(r_4' + \beta_4)}{(R_3 + r_2' + \alpha_3 + \beta_3)(R_4 + r_3' + \alpha_4 + \beta_4)(R_5 + r_4' + \alpha_5 + \beta_5)]$$

Подставляя численные величины вместо  $r_2', r_3', r_4', R_3, R_4$  и  $R_5$  и пренебрегая высшими степенями малых величин, получим:

$$U_x = I_0 \left[ R_1' \left( 1 + \frac{\alpha_1'}{R_1'} \right) + R_2' \left( 1 + \frac{\alpha_2'}{R_2'} \right) + \frac{1}{2} R_3' \left( 1 + \frac{\alpha_3'}{R_3'} + \frac{\beta_2 - \alpha_3}{400} \right) + \frac{1}{4} R_4' \left( 1 + \frac{\alpha_4'}{R_4'} + \frac{\beta_2 - \alpha_3}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80} \right) + \frac{1}{8} R_5' \left( 1 + \frac{\alpha_5'}{R_5'} + \frac{\beta_2 - \alpha_3}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80} + \frac{\beta_4 - \alpha_5}{16} \right) \right] = I_0 \left( R_1' + R_2' + \frac{1}{2} R_3' + \frac{1}{4} R_4' + \frac{1}{8} R_5' \right) \times \left( 1 + \frac{\alpha_1' + \alpha_2' + \frac{1}{2} (\alpha_3' + R_3' \frac{\beta_2 - \alpha_3}{400}) + \frac{1}{4} [\alpha_4' + R_4' (\frac{\beta_2 - \alpha_3}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80})]}{R_1' + R_2' + \frac{1}{2} R_3' + \frac{1}{4} R_4' + \frac{1}{8} R_5'} + \frac{\frac{1}{8} [\alpha_5' + R_5' (\frac{\beta_2 - \alpha_3}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80} + \frac{\beta_4 - \alpha_5}{16})]}{R_1' + R_2' + \frac{1}{2} R_3' + \frac{1}{4} R_4' + \frac{1}{8} R_5'} \right)$$

что на основании выражения (40) можем переписать в виде:

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_1' + \alpha_2' + \frac{1}{2} (\alpha_3' + R_3' \frac{\beta_2 - \alpha_3}{400})}{10000 U_k} + \frac{\frac{1}{4} [\alpha_4' + R_4' (\frac{\beta_2 - \alpha_3}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80})]}{10000 U_k} + \frac{\frac{1}{8} [\alpha_5' + R_5' (\frac{\beta_2 - \alpha_3}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80} + \frac{\beta_4 - \alpha_5}{16})]}{10000 U_k} \right), \quad (41)$$

где  $U_k$  — показание потенциометра в вольтах.

Второй, третий и четвертый члены выражения в скобках есть что иное, как общая относительная поправка к общему сопротивлению потенциометра, на котором компенсируется измеряемая разность потенциалов, т. е.

$$\frac{\alpha_k}{R_k} = \frac{\alpha_1' + \alpha_2' + \frac{1}{2} \left( \alpha_3' + R_3' \left( \frac{\beta_{n2} - \alpha_3}{400} \right) + \frac{1}{4} \left[ \alpha_4' + R_4' \left( \frac{\beta_{n2} - \alpha_4}{400} + \frac{\beta_{n3} - \alpha_4}{80} \right) \right] \right)}{10000 U_k} + \frac{1}{8} \left[ \alpha_5' + R_5' \left( \frac{\beta_{n2} - \alpha_5}{400} + \frac{\beta_{n3} - \alpha_4}{80} + \frac{\beta_{n4} - \alpha_5}{16} \right) \right] \quad (4)$$

Итак, мы определили относительную поправку к полному сопротивлению  $R_0$  главной цепи потенциометра [уравнение (30)] и относительную поправку к общему сопротивлению потенциометра, на котором компенсируется измеряемая разность потенциалов [уравнение (40)]. Таким образом, нам остается определить относительные поправки к эдс нормального элемента и к сопротивлению, на котором компенсируется эдс нормального элемента. Формула, определяющая относительную поправку  $\alpha_N/E_N$  к эдс нормального элемента, остается прежняя. Что касается формулы, определяющей относительную погрешность  $\alpha_N/R_N$  к сопротивлению, на котором компенсируется эдс нормального элемента, то она будет выражаться более сложно, в виду отсутствия специальной термо-компенсационной декады данного потенциометра для нормального элемента. Так как эдс нормального элемента компенсируется на тех же участках сопротивления потенциометра, что и неизвестная разность потенциалов, то формула, определяющая относительную поправку к  $R_N$ , будет аналогична с формулой, определяющей относительную поправку к  $R_0$ , с той только разницей, что значение величин, входящих в формулу, будет другое, т. е. мы имеем

$$\frac{\alpha_N}{R_N} = \frac{\alpha'_{n1} + \alpha'_{n2} + \frac{1}{2} \left( \alpha'_{n3} + R'_{n3} \left( \frac{\beta_{n2} - \alpha_3}{400} \right) + \frac{1}{4} \left[ \alpha'_{n4} + R'_{n4} \left( \frac{\beta_{n2} - \alpha_4}{400} + \frac{\beta_{n3} - \alpha_4}{80} \right) \right] + \frac{1}{8} \left[ \alpha'_{n5} + R'_{n5} \left( \frac{\beta_{n2} - \alpha_5}{400} + \frac{\beta_{n3} - \alpha_4}{80} + \frac{\beta_{n4} - \alpha_5}{16} \right) \right] \right)}{10000 E_N} \quad (41)$$

Так как эдс нормального элемента в промежутке рабочей температур меняется не более чем от 1,01800 до 1,01900 вольт, то сопротивление цепи потенциометра, участвующее при компенсации эдс нормального элемента, постоянно в части, необходимой для компенсации эдс нормального элемента, если бы по



следняя равнялась 1,01800 вольт, т. е. сопротивление, показываемое на потенциометре при компенсации эдс нормального элемента рычагов 1, 2 и 3 всегда одно и то же. При изменении эдс нормального элемента может измениться сопротивление, показываемое только рычагами 4 и 5. Следовательно, при изменении эдс нормального элемента могут измениться только  $\alpha_4$ ,  $\alpha_5$  и  $\beta_{n4}$ , все остальные величины, входящие в формулу (43), остаются постоянными. Выше указывалось, что величину  $R_n$  мы можем выбрать произвольно. Выберем  $R_n$  произвольно так, чтобы оно имело наименьшую поправку. Для этого достаточно принять полученное после измерения значение сопротивления в постоянной части за номинальное и произвести пересчет всех остальных полученных после изменения величин, т. е. изменить соответственно систему исчисления единиц. Тогда имеем

$$\alpha_{n1}' = \alpha_{n2}' = \alpha_{n3}' = \beta_{n2} = \beta_{n3} = 0.$$

Таким образом, вместо формулы (43) мы имеем:

$$\frac{\alpha_n}{R_n} = \frac{-\alpha_4}{320} + \frac{1}{8} \left[ \alpha'_{n5} - R'_{n5} \left( \frac{\alpha_n}{400} + \frac{\alpha_4}{80} - \frac{\beta_{n4} - \alpha_5}{16} \right) \right] \quad (43a)$$

Итак, мы имеем из (30), (42) и (43a) вместо формулы (18):

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} - \frac{\alpha_4}{320} + \frac{1}{8} \left[ \alpha'_{n5} - R'_{n5} \left( \frac{\alpha_n}{400} + \frac{\alpha_4}{80} - \frac{\beta_{n4} - \alpha_5}{16} \right) \right] + \frac{\alpha'_1 + \alpha'_2}{2} + \frac{1}{2} \left( \alpha'_n + R'_5 \frac{\beta_2 - \alpha_n}{400} \right) + \frac{1}{4} \left[ \alpha_4 + R'_4 \left( \frac{\beta_2 - \alpha_n}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80} \right) \right] + \frac{1}{8} \left[ \alpha'_5 + R'_5 \left( \frac{\beta_2 - \alpha_n}{400} + \frac{\beta_3 - \alpha_4}{80} + \frac{\beta_4 - \alpha_5}{16} \right) \right] - \frac{\alpha_0}{R_0} \right) \quad (44)$$

В формуле (44) множитель в скобках представляет собой поправочный коэффициент для потенциометров типа Бруггер.

Для определения погрешностей, влияющих на показания потенциометра, будем пользоваться тем же законом накопления погрешностей, выраженным формулой (6).

Аналогично выражениям (13), (14) и (15) мы имеем:

$$\sigma_N \leq \pm \frac{\alpha \cdot 10^{-m} E_N}{4A \cdot 10^{-n}} = \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0180}{4 \cdot 11 \cdot 10^{-1}} = 0,0000023 \text{ вольт,}$$

$$\sigma_k \leq \pm \frac{\alpha \cdot 10^{-m}}{4 I_k} = \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 10000}{4 \cdot 1} = 0,025 \text{ ома,}$$

$$\sigma_n \leq \pm \frac{a \cdot 10^{-m} R_n}{4 \cdot A \cdot 10^{-n}} = \frac{1,10^{-5} \cdot 10190}{4 \cdot 11 \cdot 10^{-1}} = 0,023 \text{ ома,}$$

$$\sigma_0 \leq \pm \frac{a \cdot 10^{-m} R_0}{4A \cdot 10^{-n}} = \frac{1,10^{-5} \cdot 11000}{4 \cdot 11 \cdot 10^{-1}} = 0,025 \text{ ома.}$$

Из равенства (40а) мы видим, что величина  $R_k$  зависит от величин  $R_1', R_2', R_3', R_4', R_5', R_6, R_0, R_5, r_2', r_3'$  и  $r_4'$ .

Следовательно средняя погрешность определения величины  $R_k$  на основании закона накопления средних погрешностей выразится формулой:

$$\sigma_k \approx \sqrt{\sum_{i=1}^{i=5} \left(\frac{\partial R_k}{\partial R_i'}\right)^2 \sigma_i'^2 = \sum_{i=3}^{i=5} \left(\frac{\partial R_k}{\partial R_i}\right)^2 \sigma_i^2 = \sum_{i=2}^{i=4} \left(\frac{\partial R_k}{\partial r_i'}\right)^2 \sigma_{r_i}'^2}$$

Считая все члены под радикалом равными между собой и раскрывая частные производные имеем:

$$\text{или } \frac{\sigma_k}{\sqrt{5}} \geq |\sigma_1'| \quad (\text{а})$$

$$\text{или } \frac{\sigma_k}{\sqrt{5}} \geq |\sigma_2'| \quad (\text{б})$$

$$\text{или } \frac{\sigma_k}{\sqrt{5}} \geq \left| \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_3'^2 + R_0' \frac{\sigma_{r_3}^2 + \sigma_3^2}{400^2}} \right| \quad (\text{в})$$

$$\text{или } \frac{\sigma_k}{\sqrt{5}} \geq \left| \frac{1}{4} \sqrt{\sigma_4'^2 + R_4' \left( \frac{\sigma_{r_4}^2 + \sigma_4^2}{400^2} + \frac{\sigma_{r_5}^2 + \sigma_4^2}{80^2} \right)} \right| \quad (\text{г})$$

$$\text{или } \frac{\sigma_k}{\sqrt{5}} \geq \left| \frac{1}{8} \sqrt{\sigma_5'^2 + R_5' \left( \frac{\sigma_{r_5}^2 + \sigma_5^2}{400^2} + \frac{\sigma_{r_6}^2 + \sigma_4^2}{80^2} + \frac{\sigma_{r_6}^2 + \sigma_6^2}{16^2} \right)} \right| \quad (\text{е})$$

Где  $\sigma_0, \sigma_4$  и  $\sigma_5$  — средние погрешности определения величин  $R_0, R_4$  и  $R_5$

$\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3', \sigma_4'$  и  $\sigma_6'$  — средние погрешности определения величин  $R_1', R_2', R_3', R_4'$  и  $R_6$ .

$\sigma_{r_2}, \sigma_{r_3}$  и  $\sigma_{r_4}$  — средние погрешности определения величин  $r_2', r_3'$  и  $r_4'$ .

После подстановки численных величин

$$\text{из (а) имеем: } \sigma_1' \geq \frac{0,025}{\sqrt{5}} = 0,01 \text{ ома}$$

$$\text{из (б) имеем: } \sigma_2' \geq \frac{0,025}{\sqrt{5}} = 0,01 \text{ ома}$$

Допуская в выражении (с), что члены под радикалом равны между собой имеем:

$$\text{или } \frac{2\sigma_k}{\sqrt{5}\sqrt{2}} \geq |\sigma_n'| \quad (g)$$

$$\text{или } \frac{2\sigma_k}{\sqrt{5}\sqrt{2}} = R_0' \sqrt{\frac{\sigma_{r_1}^2 + \sigma_n^2}{400^2}} \quad (i)$$

Из равенства (g) получим:

$$\sigma_n' \leq \frac{2 \cdot 0,025}{\sqrt{10}} = 0,016 \text{ ома.}$$

Полагая в равенстве (f) члены под радикалом равными между собой, получим:

$$\frac{2\sigma_k}{\sqrt{5}\sqrt{2}\sqrt{2}} \geq R_0' \frac{\sigma_{r_1}}{400} \quad (l)$$

$$\frac{2\sigma_k}{\sqrt{5}\sqrt{2}\sqrt{2}} \geq R_0' \frac{\sigma_{r_1}}{400} \quad (m)$$

Из равенства (l) имеем, полагая  $R_0'$  имеющим максимальное значение, т. е.  $R_0' = 200$  ом,

$$\sigma_{r_1} \leq \frac{400 \cdot 2\sigma_k}{\sqrt{5} \cdot 2R_0'} = \frac{2 \cdot 0,025}{\sqrt{5}} = 0,027 \text{ ома.}$$

Из равенства (m) имеем

$$\sigma_n = 0,022 \text{ ома.}$$

Аналогичным рассуждением получим из (d) и (e)

$$\sigma_4' \leq 0,032 \text{ ома} \quad \sigma_1 \leq 0,032 \text{ ома}$$

$$\sigma_5' \leq 0,064 \text{ " } \quad \sigma_{r_1} \leq 0,052 \text{ "}$$

$$\sigma_{r_1} \leq 0,032 \text{ " } \quad \sigma_8 \leq 0,052 \text{ "}$$

Рассуждая также, из выражения (30) можем получить

$$\text{I } \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \geq \frac{\Delta r_4'}{4 \cdot 16} \quad \text{или} \quad \Delta r_4' \leq \frac{4 \cdot 16 \cdot 0,025}{\sqrt{3}} = 0,98 \text{ ома}$$

$$\text{II } \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \geq \frac{\Delta r_3'}{4 \cdot 4} \quad \text{или} \quad \Delta r_3' \leq \frac{4 \cdot 4 \cdot 0,025}{\sqrt{3}} = 0,23 \text{ "}$$

$$\text{III } \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \geq \frac{\Delta r_2'}{4 \cdot 1} \quad \text{или} \quad \Delta r_2' \leq \frac{4 \cdot 0,025}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ "}$$

Распространяя наше рассуждение для сопротивлений в цепи нормального элемента (когда компенсируется эдс нормального элемента), мы получим для  $\alpha_{1N}', \alpha_{2N}', \dots, \alpha_{5N}', \alpha_{1N}, \beta_{2N}, \beta_{3N}$  почти те же значения, что и для  $\alpha_1', \alpha_2', \alpha_3, \alpha_4, \dots, \beta_2, \beta_3$ , так как сопротивление, вводимое в цепь нормального элемента для компенсации эдс его, мало отличается от полного сопротивления потенциометра (полное сопротивление главной цепи потенциометра равно 11000 омам, сопротивление, вводимое в цепь нормального элемента при компенсации эдс его, равно 10180—10190 омам). Поэтому оговоримся точностью выведенной нами для определения  $R_N$ .

Таким образом, чтобы пренебречь погрешностями входящих в наше уравнение величин, должно быть:

$$\begin{array}{llll} \alpha_1' \leq 0,011 \text{ ома} & & & \\ \alpha_2' \leq 0,011 \text{ " } & & \beta_2 \leq 0,022 \text{ ома} & \Delta r_2' \leq 0,058 \text{ ома} \\ \alpha_3' \leq 0,016 \text{ " } & \alpha_3 \leq 0,022 \text{ ома} & \beta_3 \leq 0,032 \text{ " } & \Delta r_3' \leq 0,023 \text{ " } \\ \alpha_4' \leq 0,032 \text{ " } & \alpha_4 \leq 0,032 \text{ " } & \beta_4 \leq 0,052 \text{ " } & \Delta r_4' \leq 0,098 \text{ " } \\ \alpha_5' \leq 0,064 \text{ " } & \alpha_5 \leq 0,052 \text{ " } & & \end{array}$$

Следовательно, при проверке потенциометров указанного типа незачем стремиться измерять сопротивления с точностью выше, чем мы это определили.

Мы нашли, что для определения сопротивлений отдельных катушек декад 3, 4 и 5 потенциометров не требуется большая точность. Эти катушки могут быть легко подогнаны с большей точностью, чем это требуется. Потому в хорошо компенсированных потенциометрах заранее можно утверждать, что:

$$\alpha_5 = \alpha_4 = \alpha_3 = \beta_4 = \beta_3 = \alpha_5' = \alpha_4' = \alpha_3' = \Delta r_4' = \Delta r_3' = 0,$$

и тогда формула (44) примет вид:

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_{1N}}{E_N} + \frac{\alpha_1' + \alpha_2' + \frac{1}{2} R_3' \frac{\beta_2}{400} + \frac{1}{4} R_4' \frac{\beta_3}{400} + \frac{1}{8} R_5' \frac{\beta_2}{400} - \frac{\Delta r_2'}{4R_0} \right) \quad (44a)$$

Величины  $R_3'$ ,  $R_4'$  и  $R_5'$  мы можем представить в виде:

$$R_3' = 20 K_3; R_4' = 4 K_4; R_5' = 0,8 K_5,$$

где  $K_i$  — номер катушки соответствующих декад, коэффициенты при  $K_i$  — соответствующие номинальные значения в омах каждой катушки. Тогда формула (44a) после сокращения примет вид:

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_{1N}}{E_N} + \frac{\alpha_1' + \alpha_2' + K_3 \frac{\beta_2}{40} + K_4 \frac{\beta_3}{400} + K_5 \frac{\beta_2}{4000} - \frac{\Delta r_2'}{4R_0} \right)$$

Величинами  $K_4 \frac{\beta_2}{400}$  и  $K_3 \frac{\beta_2}{4000}$ , если  $\beta_2 < 10 \alpha_1$ , можем пренебречь, тогда имеем окончательно для случая, если последние три декады потенциометра Бруггера не имеют поправок,

$$U_x = U_k \left( 1 + \frac{\alpha_N}{E_N} + \frac{\alpha_1' + \alpha_2' + K_3 \frac{\beta_2}{40}}{10000 U_k} - \frac{\Delta r_2'}{4R_0} \right) \quad (44b)$$

ТЕОРИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ  
завода „Эталон“ (Ленинград)

При измерении разности потенциалов на потенциометре через посредство делителя напряжения, непосредственно на потенциометре мы измеряем падение напряжения на некотором участке сопротивления делителя напряжения. Если обозначим этот участок сопротивления делителя напряжения через  $R_i$ , а силу тока, проходящего по нему, через  $i$ , то показание потенциометра  $U_k$  в вольтах будет выражаться формулой:

$$U_k = iR_i \quad (45)$$

Сила тока  $i$ , проходящая через делитель напряжения, с полным сопротивлением  $R_0$  последнего и с измеряемой неизвестной разностью потенциалов имеет следующую зависимость:

$$i = \frac{U_x}{R_0}$$

Подставляя это значение для  $i$  в выражение (45), имеем:

$$U_k = \frac{U_x R_i}{R_0},$$

откуда получаем

$$U_x = U_k \frac{R_0}{R_i} \quad (46)$$

Введя к величинам  $U_k$ ,  $R_0$  и  $R_i$  поправки, обозначая их через  $\alpha_k$ ,  $\alpha_0$  и  $\alpha_i$ , соответственно будем иметь:

$$U_x = (U_k + \alpha_k) \frac{R_0 + \alpha_0}{R_i + \alpha_i}$$

После преобразования получим:

$$U_x = U_k \frac{R_0}{R_i} \left( 1 + \frac{\alpha_k}{R_k} + \frac{\alpha_0}{R_0} - \frac{\alpha_i}{R_i} \right) \quad (47)$$

В выражении (47) из трех величин, стоящих за скобками в правой части равенства, две величины можем выбрать произвольно. Поэтому за величину  $U_k$  выберем показание потенциометра уже исправленное, и следовательно, поправку к  $U_k$

в формуле (47) можем не вводить. Выберем также произвольно величину  $R_0$ , причем выберем величину  $R_0$  так, чтобы поправка к ней равнялась нулю. Тогда формула (47) переписется в виде:

$$U_x = U_k \frac{R_0}{R_i} \left( 1 - \frac{\sigma_i}{R_i} \right) \quad (48)$$

где  $i = 1, 2, 3$  и т. д.

Этой формулой и следует пользоваться для внесения поправок к измеряемой разности потенциалов.

Для определения максимальной точности, с какой мы должны определить величины  $R_0$  и  $R_i$ , воспользуемся формулой (6). В данном случае формула (6) переписется в виде:

$$S_x = \sqrt{\left( \frac{R_0}{R_i} \sigma_k \right)^2 + \left( \frac{U_k \sigma_0}{R_i} \right)^2 + \left( \frac{U_k R_0 \sigma_i}{R_i^2} \right)^2} \quad (49)$$

где  $i = 0, 1, 2, 3$  и т. д.

Делитель напряжения, как известно, позволяет подавать измеряемую разность потенциалов на потенциометр с уменьшением в  $10^i$  раз ( $i$  равно 1, 2, 3 и т. д.), т. е. мы измеряем на потенциометре

$$\frac{1}{10^i} U_{xi} = U_k$$

откуда получаем

$$U_{xi} = 10^i U_k \quad (50)$$

Из выражений (46) и (50) мы можем заключить, что

$$\frac{R_0}{R_i} = 10^i \quad (51)$$

отсюда имеем

$$R_i = \frac{R_0}{10^i} \quad (52)$$

Так как величины  $R_i$  и  $R_0$  должны быть кратны десяти, то величину  $R_0$  мы можем выразить через 10 в некоторой степени  $s$ , т. е.

$$R_0 = 10^s$$

Подставляя это значение для  $R_0$  в выражение (52), имеем

$$R_i = \frac{10^s}{10^i} = 10^{s-i} \quad (53)$$

Таким образом, выражение (48) на основании формулы (51) и (53) можем переписать в виде:

$$U_{xi} = U_k 10^i \left( 1 - \frac{\sigma_i}{10^{s-i}} \right) \quad (54)$$

Поверенный нами делитель напряжения имеет три предела. Следовательно  $i$  равняется 1, 2 и 3. Величина  $R_0$  имеет порядок 100000 ом, следовательно  $s = 5$ .

Итак, в нашем случае, для трех пределов измерения мы имеем:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для первого предела} \\ U_{x1} = U_k 10^1 \left( 1 + \frac{\sigma_1}{10^{5-1}} \right) = U_k 10^1 \left( 1 - \frac{\sigma_1}{10^4} \right) \\ \text{для второго предела} \\ U_{x2} = U_k 10^2 \left( 1 + \frac{\sigma_2}{10^{5-2}} \right) = U_k 10^2 \left( 1 - \frac{\sigma_2}{10^3} \right) \\ \text{для третьего предела} \\ U_{x3} = U_k \cdot 10^3 \left( 1 + \frac{\sigma_3}{10^{5-3}} \right) = U_k \cdot 10^3 \left( 1 - \frac{\sigma_3}{10^2} \right) \end{array} \right\} \quad (55)$$

Ответ на вопрос, с какой точностью мы должны измерить величины  $R_0$  и  $R_f$ , мы получим, из формулы (49).

Нижний предел измерения потенциометра, в схеме которого участвует данный делитель напряжения, равен  $1 \cdot 10^{-5}$  вольта, высший предел — 1,5, вольта или  $15 \cdot 10^{-1}$  вольта. Следовательно, в данном случае  $a = 1$ ;  $m = 5$ ;  $A = 15$  и  $n = 1$ .

Из формулы (49) аналогично выражениям (13), (14) и (15) имеем

$$\sigma_1 \leq \frac{a \cdot 10^{-m} \cdot R_f}{2\sqrt{3} \cdot A \cdot 10^{-n}} = \frac{1 \cdot 10^{-5} R_f}{2 \cdot 15 \cdot 10^{-1} \sqrt{3}}$$

или, заменяя  $R_f$  значением для него из (53), имеем

$$\sigma_1 \leq \frac{10^{-5} \cdot 10^{5-i}}{2 \cdot 15 \cdot 10^{-1} \sqrt{3}} = 0,000002 \cdot 10^{5-i}; \quad (56)$$

аналогично имеем

$$\sigma_0 \leq \frac{10^{-5} R_0}{2 \cdot 15 \cdot 10^{-1} \sqrt{3}} = 0,000002 \cdot 10^5. \quad (57)$$

Следовательно для нашего случая из (56) и (57) имеем:

$$\begin{array}{ll} \sigma_0 \leq \pm 0,2 & \text{ома} \\ \sigma_1 \leq \pm 0,02 & \text{"} \\ \sigma_2 \leq \pm 0,002 & \text{"} \\ \sigma_3 \leq \pm 0,0002 & \text{"} \end{array}$$

После поверки делителя напряжения мы получили следующие значения для  $R_i$  и  $R_0$ :

Измеренные значения	Округленные
$R_0 = 100006,698$	100006,6
$R_1 = 10003,035$	10003,04
$R_2 = 1000,3467$	1000,346
$R_3 = 99,9696$	99,9696

Выше мы уже решили на основании теоретических рассуждений величину  $R_0$  выбрать произвольной. Выберем сопротивление  $R_0$  равным  $10^5$  ом и изменим соответственно систему исчисления единиц. Для этого умножим каждое, полученное после измерения, сопротивление на  $10^5$  и разделим на  $R_{x0}$ . Тогда будем иметь

$$R_0 = \frac{R_{x0}}{R_{x0}} \cdot 10^5 = \frac{100006,6}{100006,6} 10^5 = 100000 \text{ ом,}$$

$$R_1 = \frac{R_{x1}}{R_{x0}} \cdot 10^5 = \frac{10003,04}{100006,6} 10^5 = 10002,38 \text{ ома,}$$

$$R_2 = \frac{R_{x2}}{R_{x0}} \cdot 10^5 = \frac{1000,346}{100006,6} 10^5 = 1000,280 \text{ ома,}$$

$$R_3 = \frac{R_{x3}}{R_{x0}} \cdot 10^5 = \frac{99,9696}{100006,6} 10^5 = 99,9630 \text{ ома.}$$

Из формулы (53) имеем, что

$$R_1 = \frac{R_0}{10^1} = \frac{10^5}{10^1} = 10^{5-1} = 10000 \text{ ом,}$$

$$R_2 = \frac{10^5}{10^2} = 10^{5-2} = 1000 \text{ ом,}$$

$$R_3 = \frac{10^5}{10^3} = 10^{5-3} = 100 \text{ ом.}$$

Теперь можем определить поправки  $\alpha_i$ , именно:

$$\alpha_0 = 0$$

$$\alpha_1 = 10002,38 - 10000 = +2,38 \text{ ома,}$$

$$\alpha_2 = 1000,280 - 1000 = +0,280 \text{ ом,}$$

$$\alpha_3 = 99,9630 - 100 = -0,0370 \text{ ома.}$$

Подставляя численные значения поправок в формулы (55), имеем окончательно:

$$U_{x1} = U_k \cdot 10^1 (1 - 2,38 \cdot 10^{-4}) = 10^1 \cdot U_k \cdot 0,99976 \text{ вольт,}$$

$$U_{x2} = U_k \cdot 10^2 (1 - 0,280 \cdot 10^{-3}) = 10^2 \cdot U_k \cdot 0,99972 \text{ вольт,}$$

$$U_{x3} = U_k \cdot 10^3 (1 + 0,0370 \cdot 10^{-2}) = 10^3 \cdot U_k \cdot 1,000370 \text{ вольт.}$$

Москва, РОНИИМ, Электрическая лаборатория



## LA THÉORIE DES ERREURS DES POTENTIOMÈTRES

Par Nicolaïef F. N.

(Résumé)

L'examen des erreurs des potentiomètres comprend deux parties: dans la première on détermine le coefficient de correction, dans la seconde on établit la précision maximale, avec laquelle on doit déterminer les valeurs individuelles de la formule qui exprime la valeur mesurée.

Les potentiomètres à rhéocordes, ceux de Wolf et de Brugger et le diviseur de tension sont examinés. En déterminant le coefficient de correction l'auteur admet que ces valeurs individuelles qui entrent dans la formule définitive exprimant la valeur mesurée, ont une certaine correction, et en se basant sur cela, il déduit le coefficient de correction. Pour établir la précision maximale avec laquelle on doit déterminer les valeurs individuelles, l'auteur se sert de la loi de l'accumulation des erreurs, et il trouve l'ordre de la grandeur des corrections qui n'ont pas d'influence sur le résultat de la mesure. En d'autres termes, il établit la précision, avec laquelle on doit connaître les valeurs qui entrent dans la formule déterminant la valeur mesurée sur le potentiomètre, pour garantir que la valeur mesurée a une erreur qui ne dépasse pas une demi-unité du dernier signe du potentiomètre. Tous les cas examinés, à l'exception de celui du potentiomètre de Brugger, sont illustrés par des exemples numériques.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

А. А. Чечулин

Современные методы измерений на переменном токе технической частоты в значительной мере уступают по точности измерениям на постоянном токе. Если на компенсационных приборах постоянного тока возможно измерять разности потенциалов порядка одного вольта с точностью до  $10^{-5}$  и даже до  $10^{-6}$  вольта, т. е. до  $10^{-3} - 10^{-4} \%$  измеряемой величины, то предельной точностью измерений на потенциометрах переменного тока будет величина порядка  $0,2\%$ . Такого же порядка или несколько хуже точность измерений более высоких разностей потенциалов с применением делителей напряжений, сил токов с помощью образцовых сопротивлений и сопротивлений путем сравнения их с образцовыми.

Одна из причин такой невысокой точности измерений на переменном токе технической частоты — необходимость устанавливать ток питания компенсатора при помощи стрелочного прибора (обычно электродинамического, поверенного на постоянном токе) предельной точностью которого является величина порядка  $0,2\%$ . В тех случаях, когда требуются отсчеты угла сдвига, точность измерений оказывается еще хуже, так как в приборах типа Tinsley-Drysdale этот отсчет производится по указанию фазорегулятора с точностью порядка  $0,5^\circ$  а в компенсационных приборах координатного типа (Geiger) размеры шкалы не позволяют производить отсчеты с большей точностью. Если учесть некоторую реактивность так называемых „безиндукционных и беземкостных сопротивлений“ — частей компенсационных приборов переменного тока, делителей напряжений, образцовых катушек сопротивлений и т. п., то даже и точность порядка  $0,2\%$  можно подвергнуть некоторому сомнению. Само собой разумеется, что такая невысокая точность измерений на переменном токе во многих случаях не соответствует современным требованиям техники. Особенно остро чувствуется это при исследованиях измерительных приборов.

В поисках методов для повышения точности некоторых измерений на переменном токе технической частоты в лаборатории

переменного тока ВИМСа была сделана попытка применить для этой цели электронную лампу.

В электроизмерительных установках электронная лампа применяется почти со времени ее изобретения, но область ее применения ограничивается либо токами высокой и акустической частоты, где она во многих случаях незаменима, либо в радиолюбительских установках, не требующих особой точности. Кроме того, в настоящее время электронная лампа является одним из элементов многих схем для измерений неэлектрических величин.

Применение электронной лампы в измерительных установках переменного тока представляется весьма заманчивым, главным образом потому, что таким образом можно заменить измерение переменного напряжения измерением зависящего от него пульсирующего анодного тока приборами постоянного тока и в частном случае компенсационными приборами, а следовательно, можно надеяться повысить точность измерений.

Единственным и весьма серьезным затруднением в этом случае является неустойчивость и непостоянство работы лампы, но при надлежащих условиях работы, как это следует из дальнейшего, оказывается возможным настолько стабилизировать работу лампы, что точность при некоторых измерениях на переменном токе технической частоты повышается до 0,1% измеряемой величины, а при особо благоприятных условиях даже до 0,05%.

Каковы же причины неустойчивости работы лампы?

Если обратиться к схеме простейшего измерительного прибора с трехэлектродной лампой — лампового вольтметра с анодным детектированием (рис. 1), можно установить, что сила анодного тока лампы зависит от целого ряда условий, которые можно разделить на две категории: 1) условия, зависящие от конструктивных качеств лампы, и 2) внешние по отношению к лампе условия, в которые поставлена ее работа. Эти факторы выявляются из анализа физических условий работы лампы и схемы ее включения в ламповом вольтметре (рис. 1).

Как известно, нить  $K$  — катод — накаливается током от батарей  $B_n$  и излучает электроны. Катод окружен цилиндром  $A$ , с которым соединен положительный полюс анодной батареи  $B_a$ , отрицательный полюс ее приключен к цепи накала. Таким образом, между анодом и катодом имеется электрическое поле, направленное от анода к катоду. Это поле действует на выделяющиеся с катода электроны с силой, направленной в сторону катода. На это

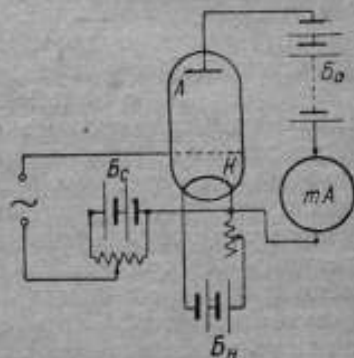


Рис. 1.

поле накладывается другое, созданное находящимися между анодом и катодом электронами, которые образуют так называемый пространственный заряд. Это второе поле направлено в сторону, обратную первому. Напряжение результирующего поля, очевидно, на некотором расстоянии от анода будет равно нулю. В этих точках, образующих цилиндрическую эквипотенциальную поверхность, значение потенциала будет минимальным (максимальным отрицательным). Внутри этой цилиндрической поверхности электроны находятся под действием сил, направленных к катоду, а вне — к аноду. В зависимости от кинетической энергии, с которой вылетает электрон из катода, он либо возвратится к катоду, либо, пройдя поверхность минимального потенциала, притянется к аноду.

Сетка, помещающаяся между анодом и катодом (чаще всего имеющая в маломощных лампах форму спирали), в зависимости от потенциала, поданного на нее, изменяет поле между анодом и катодом. При положительном потенциале на сетке минимальный потенциал в поле возрастает, а поверхность его смещается к катоду, и количество электронов, попадающих на анод, увеличивается, так как минимальная энергия электрона, необходимая для пролета через этот потенциальный барьер, будет ниже. В противном случае, т. е. при отрицательном потенциале сетки, анодный ток убывает и при некотором значении отрицательного потенциала прекращается. На рис. 2 схематически дано распределение потенциала между катодом и анодом. Кривая I отвечает значению анодного потенциала, при котором все выделяющиеся электроны попадают на анод, т. е. случаю тока насыщения. В этом случае на всем протяжении пространства анод — катод потенциал положительный. Кривая II соответствует двухэлектродной (без сетки) лампе при анодном токе, не достигающем насыщения. Для этого случая в верхней части рисунка дано распределение электронов между анодом и катодом. Кривая II' дает распределение плотности объемного заряда. Кривые III — III' соответственно дают распределение потенциала и плотности объемного заряда при положительном потенциале на сетке, а кривые IV и IV' — тоже при отрицательном потенциале.

Из изложенной схематически общей картины работы электронной лампы можно сделать заключение о возможных причинах неустойчивости ее работы и наметить пути для их устранения.

Очевидно, что анодный ток лампы зависит от: 1) количества выделяющихся из катода электронов, т. е. эмиссии лампы; 2) напряженности поля между анодом и катодом, а следовательно от потенциала анода и сетки. Конечно, поле в лампе зависит также от размеров и взаимного расположения ее элементов: анода, катода и сетки. Таким образом, надлежит установить степень постоянства этих факторов и найти меры для ее повышения.

Из предварительных опытов при снятии статических характеристик с электронных ламп различных типов вполне подтвер-

дился общеизвестный факт непригодности для измерительных целей ламп всех типов с катодами торированными, оксидными и бариевыми. Эмиссия этих ламп резко непостоянна. Таким образом, подлежали детальному исследованию только два типа ламп: с чистым вольфрамовым катодом П17 (по старой номенклатуре

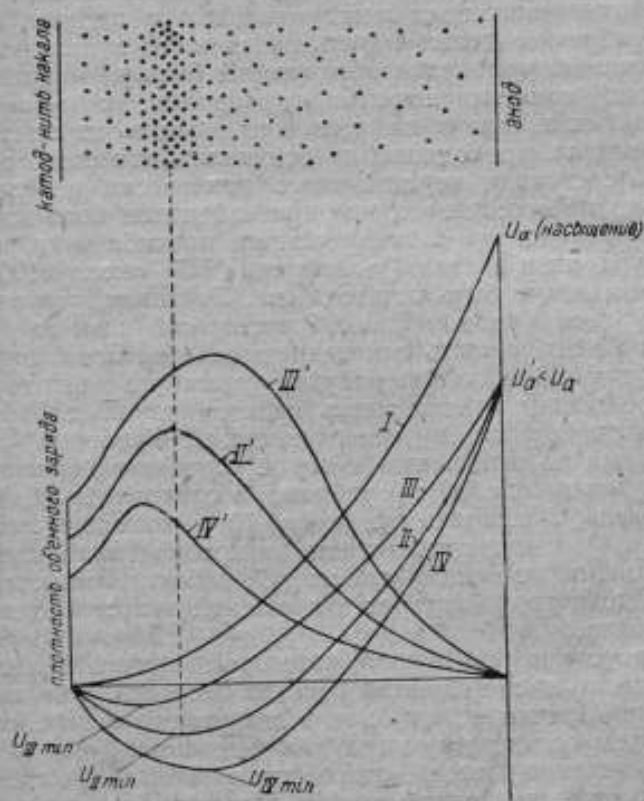


Рис. 2.

РБ) и РДС (двухсетка) — тип, снятый в настоящее время с производства.

Таким образом, первое необходимое условие постоянства работы лампы — чистый вольфрамовый катод. Вторым необходимым условием является возможно совершенный вакуум в баллоне. При исследовании ламп указанных типов примерно  $\frac{1}{10}$  оказывалась непригодной, так как эмиссия этих ламп колебалась в пределах до 1%. Наличие остатков газа легко обнаруживалось по уступам в характеристике лампы. Третьим необходимым условием стабильности работы лампы можно считать наличие совершенной изоляции между

электродами лампы и постоянство ее. Влияние несовершенств изоляции в некоторых экземплярах ламп удавалось ослабить снятием цоколя лампы. И наконец четвертым необходимым условием постоянства работы лампы, зависящим от ее конструктивных качеств, является отсутствие деформаций электродов лампы при изменении сеточного потенциала. Деформации сетки и нити накала при изменении поля между катодом и анодом, если они имеются, конечно, должны быть очень малы и при измерениях со стрелочными приборами обнаружены быть не могут. Но при измерениях компенсационными приборами, с возможностью отсчета пятых значащих цифр, можно ожидать их влияния.

Нить накала, проходящая по оси цилиндрического анода, находится в состоянии неустойчивого равновесия в поле анод-катод. Вполне естественно, что при изменении поля изменением сеточного потенциала можно ожидать прогиба нити, и так как температура нити накала (у ламп типа П7) около  $2100^{\circ}\text{C}$ , эти деформации могут быть остаточными. Учитывая, что расстояние между катодом и анодом менее 5 мм, прогиб нити на несколько микронов может вызвать изменение поля, заметное в пятом знаке анодного тока. В дальнейшем будет упомянуто о некоторых опытах, позволяющих предполагать наличие таких деформаций, а также мерах, повидимому ослабляющих их влияние.

Внешними по отношению к лампе условиями, влияющими на ее работу, являются: 1) ток накала, а следовательно, и напряжение накала, 2) напряжение анода, 3) смещающее напряжение на сетке и 4) температура среды, в которой находится лампа. Необходимыми условиями стабильной работы лампы, очевидно, будет постоянство этих трех напряжений и постоянство температуры лампы.

Если в устранении первой категории причин непостоянства работы лампы экспериментатор почти бессилён, то влияние второй группы причин может быть в значительной мере ослаблено применением соответствующего оборудования.

Для выявления условий, способствующих наибольшей стабильности работы электронной лампы, снимались ее характеристики при различных и одинаковых режимах. Из сравнения нескольких характеристик, снятых при одном и том же режиме, можно сделать заключение о пределах, в которых изменяется анодный ток при тех же условиях работы лампы. Из сопоставлений характеристик, снятых при различных режимах, можно установить режим наиболее благоприятный в отношении постоянства работы лампы и степени пригодности данного экземпляра для метрологических целей.

В лаборатории переменного тока было исследовано по несколько экземпляров ламп типа Р5 и РДС. Статические характеристики снимались по схеме, приведенной на рис. 3. Питание накала осуществлялось мощной аккумуляторной батареей напряжением 4 вольта и емкостью 1200 ампер-часов.

Такая высокая емкость отнюдь не вызывалась необходимостью, но объяснялась наличием возможности использовать эту батарею в часы, когда она была свободна.

Вполне достаточной емкостью батареи накала надо считать емкость порядка 200—300 ампер-часов, если работать в период разряда, соответствующий горизонтальному участку характеристики аккумулятора. Как показал опыт, наиболее благоприятным как в отношении достаточной эмиссии, так и в отношении постоянства ее является ток, сниженный против нормального до величины 0,59—0,60 ампер, и напряжение накала около 3,1 вольта. При такой нагрузке батарея накала за время работы в течение 6—10 часов заметно не снижала напряжения. Вторым необходи-

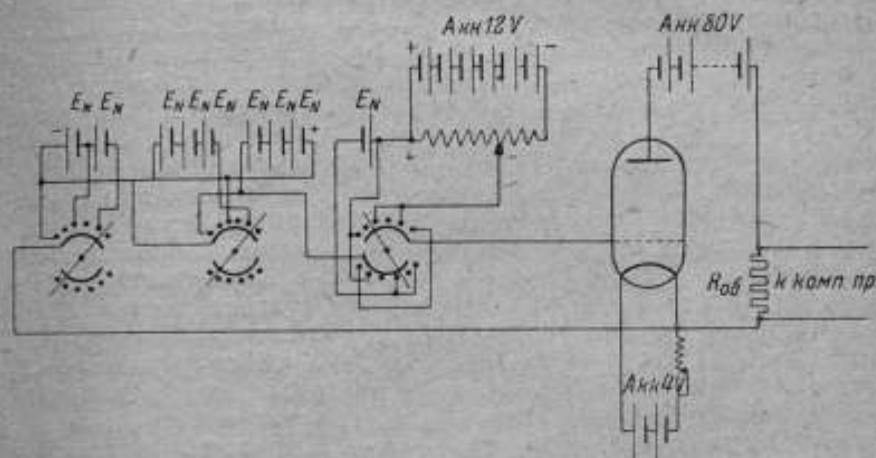


Рис. 3.

мым условием постоянства напряжения батареи накала является постоянство температуры в аккумуляторном помещении. Пуск в нем вентилятора немедленно отражался на работе лампы в колебаниях анодного тока.

Анодная батарея применялась типа РТ4 емкостью 2,5 ампер-часа. Так как обычно при работе с лампой анодный ток не превышал величины 1 миллиампера, такая емкость была вполне достаточной. Сеточный потенциал в части опытов задавался от батареи аккумуляторов в 12 вольт, емкостью 60 ампер-часов, включенной потенциометрически. Так как незначительные изменения сеточного потенциала заметно изменяли анодный ток, при длительной работе с лампой оказалось более удобным применять для подачи потенциала на сетку ряд нормальных элементов Вестона. Это оказалось возможным, так как характеристика ламп почти полностью лежит в области отрицательных потенциалов на сетке, и, следовательно, сеточный ток лампы даже при отрицательном потенциале, поданном от одного нормального элемента (в 1,0184

вольта), исчезающе мал. Но все же, во избежание изменения сеточным током электродвижущей силы нормального элемента включенного первым от сетки, на это место был помещен специальный ртутно-кадмевый элемент большой емкости. Его электродвижущая сила не изменялась даже током в 1 микроампер протекавшим в течение 30 минут. Сеточный ток при потенциале на сетке  $U_c = 0$  был 0,07 микроампера.

Все измерения производились на универсальном компенсационном приборе Tinsley-Drysdale. Для измерения силы анодного

тока в анодной цепи лампы было включено образцовое сопротивление  $R_{об} = 1000$  ом. Напряжение накала анодной батареи  $U_a$  и напряжение на сетке (при работе без нормальных элементов) измерялось при помощи делителей напряжения сопротивлением в 25000 ом. Эти делители на рис. 3 не показаны.

Для суждения о качестве измерений подсчитывалось значение разностей первого и второго порядка на интервал изменения сеточного потенциала. На рис. 4 (кривая А) приведена характеристика одного экземпляра лампы типа П7, снятая для  $U_c$  от 2,5 до 7,5 вольт через 0,5

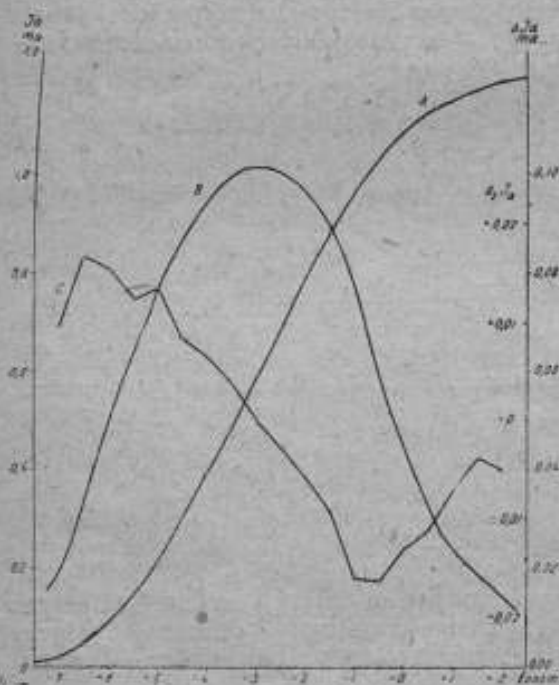


Рис. 4.

вольт. Значения разностей 1-го и 2-го порядка даются кривыми В и С. Масштаб по оси ординат для кривой С в 20 раз крупнее, чем для кривой А. Пик на кривой С на ординате  $U_c = -5$  вольт является не случайным дефектом измерения и повторяется на всех кривых разностей 2-го порядка данного типа ламп.

Для иллюстрации возможностей повторного получения одного и того же режима лампы и степени точности при получении одной и той же характеристики в табл. 1 приведены значения анодного тока для двух серий из четырех характеристик. Характеристики каждой серии снимались последовательно одна за дру-



гой. Вторая серия—на следующий день после первой. В промежутке между ними в течение суток лампа оставалась включенной. Потенциал на сетку подавался нормальными элементами.

ТАБЛИЦА 1

Потенциал на сетке в $E_N = -1,0184 V$	Анодный ток в $10^{-6} \text{ mA}$							
	Первая серия				Вторая серия			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
0	102482	102417	102486	102400	100793	100848	100782	106779
-1	84777	84691	84707	84613	83190	83229	83131	83100
-2	65732	65651	65621	65523	64298	64329	64217	64182
-3	46792	46727	46658	46591	45552	45570	45478	45469
-4	29953	29891	29814	29760	28959	28986	28894	28933
-5	16112	16066	15996	15952	15420	15437	15371	15432
-6	6553	6538	6491	6469	6205	6230	6191	6248
-7	1792	1792	1777	1770	1660	1692	1672	1694
-8	259	270	270	267	228	256	249	250

Обе серии характеристик снимались при одинаковых напряжениях накала и анода. Меньшая эмиссия во второй серии объясняется утонением вити накала после 24-часовой работы.

На рисунке 5 и 6 приведены характеристики (A) и кривые первых (B) и вторых (C) разностей по данным I столбцов табл. 1. В нижних частях рисунков в диаграммах A даны разности между значениями анодных токов в столбцах II—IV и значениями их в столбце I. Масштаб на диаграмме A увеличен в 100 раз по сравнению с масштабом основной характеристики в верхней части рис. 5 и 6.

На диаграммах B и C даны аналогичные величины для первых и вторых разностей в увеличенном масштабе в 5 раз для B и в 20 раз для C.

Из данных табл. 1 и рис. 5 и 6 можно сделать некоторые заключения. Колебания силы анодного тока в характеристиках второй серии больше, чем в первой. Причина этого вероятно лежит в менее благоприятных условиях снятия характеристик второй серии; возможно, что это объясняется большими колебаниями температуры лаборатории и аккумуляторного помещения. Величина колебаний первых и вторых разностей для обеих серий одного порядка, а следовательно, характер работы лампы не изменился, и причины этих колебаний надо искать в органических качествах лампы.

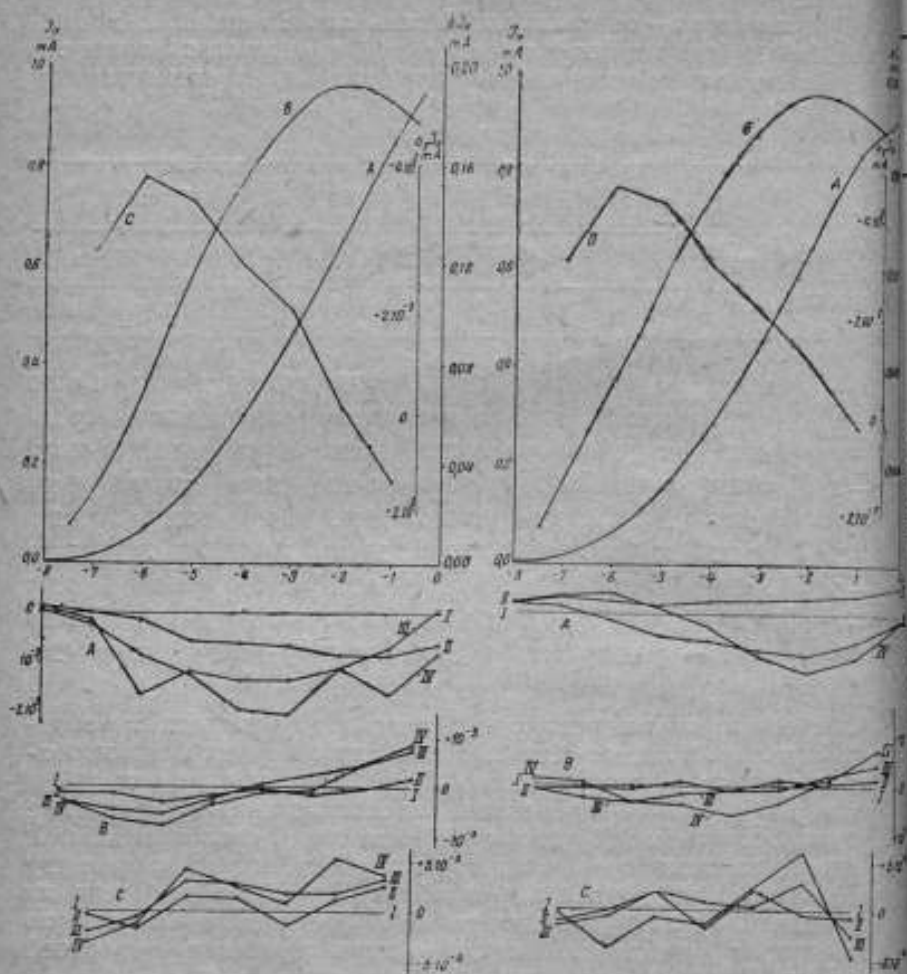


Рис. 5.

Рис. 6.

В поисках способов устранения этих колебаний повидимому были получены некоторые положительные результаты путем помещения лампы в магнитное поле, направленное по направлению нити накала. В этом случае характеристика несколько снижалась, так как электроны получали движение по спирали и увеличивали этим пространственный заряд.

Значения анодного тока для серии из трех характеристик, снятых при напряжении накала и анода одинаковых с характеристиками, данными в табл. 1-й, но при наложении на лампу магнитного поля напряженностью около 250 эрстедов, направленного параллельно нити накала, приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

Потенциал на сетке в $E_N = 1,0184 \text{ В}$	Анодный ток в $\text{mA} \cdot 10^{-5}$			Потенциал на сетке в $E_N = 1,0184 \text{ В}$	Анодный ток в $\text{mA} \cdot 10^{-5}$		
	I	II	III		I	II	III
0	99 710	99 719	99 722	-5	14 569	14 543	14 518
-1	81 971	81 971	81 941	-6	5 729	5 681	5 679
-2	62 971	62 964	62 920	-7	1 491	1 438	1 444
-3	44 312	44 295	44 258	-8	213	155	185
-4	27 880	27 859	27 825				

Данные таблицы 2 представлены графически на рис. 7. Кривая *A* — характеристика, кривые *B* и *C* — разности 1-го и 2-го порядка для характеристики *I*. Диаграммы в нижней части рис. 7 *A* — разности между значениями анодного тока II и III характеристики *I*; *B* и *C* — то же для разностей 1-го и 2-го порядка. Масштабы одинаковы с рис. 5 и 6. Сравнение рис. 7 с рис. 5 и 6 позволяет вывести заключение, что в магнитном поле работа лампы несколько стабильнее, чем при отсутствии такового.

При сравнении рис. 4—7 обращает внимание полное подобие кривых вторых разностей, вычерченных в достаточно крупном масштабе. Это указывает на то, что пики на кривой не являются результатами неустойчивости работы лампы и что практически вполне достижима стабильность ее работы в пределах 0,05% анодного тока при малых сдвигах и 0,1% при сдвигах на сетке порядка 5—6 вольт.

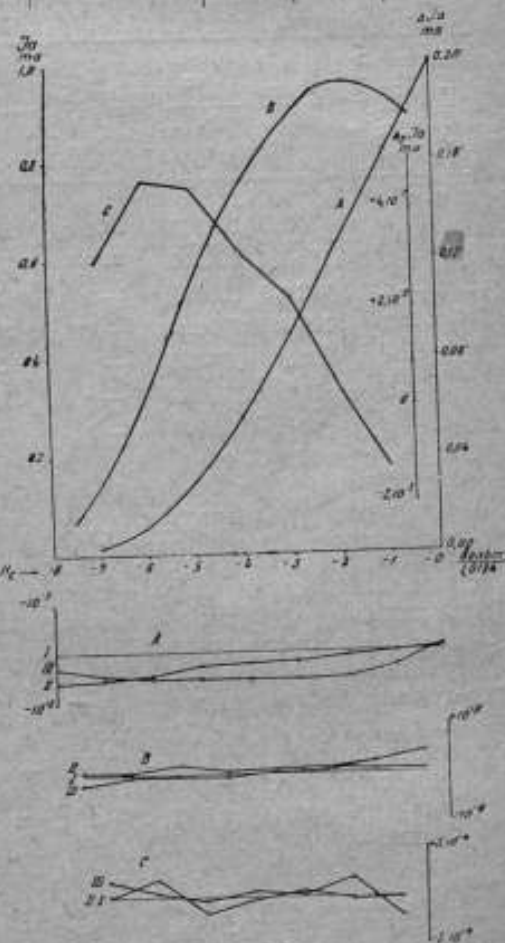


Рис. 7.

При исследовании лампы типа РДС были получены аналогичные результаты. В табл. 3 приведены данные для двух характеристик двухсеточной лампы с катодной сеткой, приключенной к катоду. Управляющей была анодная сетка. Потенциал на сетке подавался от 0 до  $-18E_N$ ; от 0 до  $U_c = -9E_N$  — нормальными элементами, а свыше последовательно с ними приключался аккумулятор напряжением 12 вольт, замкнутый на потенциометр. Потенциометр устанавливался в положение, соответствующее сдвигу  $U_c = -9E_N$  по анодному току при таком сдвиге. К этому напряжению приключались последовательно нормальные элементы для получения потенциала на сетке от  $U_c = -10E_N$  до  $U_c = -18E_N$ .

ТАБЛИЦА 3

Потенциал управляющей сетки в $E_N = 1,0184$ V	Анодный ток в $\text{mA} \cdot 10^{-5}$		Потенциал управ. анод. сетки в $E_N = 1,0184$ V	Анодный ток в $\text{mA} \cdot 10^{-5}$		Потенциал управ. сетки в $E_N = 1,0184$ V	Анодный ток в $\text{mA} \cdot 10^{-5}$	
	I	II		I	II		I	II
0	133 330	133 373	-7	56 351	56 282	-14	4 340	4 280
-1	123 350	123 382	-8	44 950	44 889	-15	3 501	3 450
-2	112 919	112 922	-9	32 891	32 853	-16	3 040	3 000
-3	100 324	100 279	-10	22 989	22 976	-17	2 705	2 680
-4	88 900	88 873	-11	15 224	15 215	-18	2 449	2 430
-5	77 902	77 869	-12	9 353	9 321			
-6	67 179	67 198	-13	5 922	5 928			

На рис. 8 построены, аналогичные данным для лампы типа П на рис. 5, 6 и 7, характеристика и кривые разностей 1-го и 2-го порядка по данным табл. 3 для случая I. В нижней части рисунка даны диаграммы разностей между анодными токами разностями, относящимися к случаю II и I. Масштабы для ординат на рис. 8 одинаковы с масштабами рис. 5—7.

При сопоставлении характеристик, снятых при изменении сеточного потенциала в направлении возрастания анодного тока с характеристиками, снятыми при изменении потенциала в обратном направлении, обнаружилось явление „инерции изменения анодного тока“. Это явление проявляется совершенно определенно при измерениях с большим числом знаков, т. е. компенсационным прибором, и при измерениях стрелочными приборами обнаружено быть не может. Сущность его заключается в следующем. При изменении потенциала сетки с меньшего значения на большее (т. е. с большего отрицательного на меньшее) анодный ток возрастает в первый момент до величины, большей той которую он принимает при установившемся режиме. При умень-

шении потенциала сетки анодный ток в первый момент убывает до величины меньшей, чем ему следует иметь при новом потенциале. Таким образом, характеристики, снятые при возрастании анодного тока с отсчетом тотчас же после переключения, оказываются лежащими выше характеристик, снятых при убывании анодного тока, причем это явление заметно резко при большем изменении сеточного потенциала, а следовательно, и анодного тока.

На рис. 9 кружками обозначены значения анодного тока при переключении потенциала сетки от значения  $U_c = E_N$  на значение  $U_c = -2E_N$  и крестиками — от  $U_c = -3E_N$  на то же значение  $U_c = -2E_N$ . На рис. 10 кружками от значения  $U_c = -2E_N$  и крестиками от  $U_c = -8E_N$  на значение потенциала сетки  $U_c = -5E_N$ . Из обеих диаграмм видно, что кружки лежат выше крестиков. Подъем ломаной линии на рис. 9 вызван имевшим место изменением режима, повидимому вследствие изменений внешних условий.

Из сравнения рис. 9 и 10 видно, что разность между крайними значениями анодного тока при переключении с большего на меньший сеточный потенциал и наоборот примерно пропорциональна величине перепада сеточного потенциала. Как показывает опыт, эта разность убывает с увеличением промежутка времени между моментом переключения потенциала сетки и моментом отсчета силы анод-

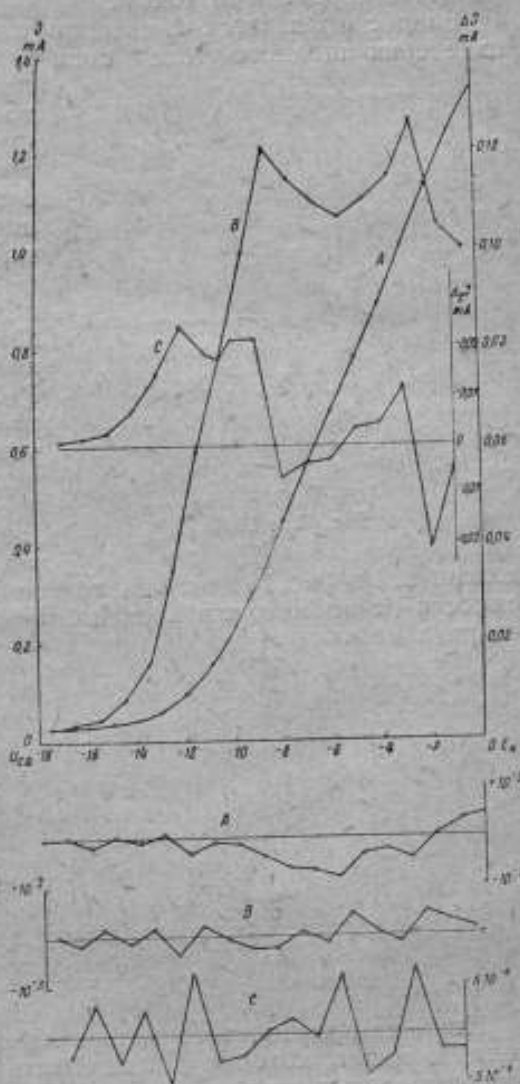


Рис. 8.

ного тока, причем пределом этой разности является измеримая величина, не равная нулю. Это явление обнаружено также и при работе с переменным током.

Вопрос о физической интерпретации этого явления „инерция изменения анодного тока“ пока надо считать открытым. Одно из возможных объяснений этого явления — отчасти длительность процесса стабилизации пространственного заряда — быть может, отчасти деформации нити накала и сетки (упругие и остаточные).

Кроме уже освещенных сторон работы лампы, необходимо упомянуть о значительной тепловой инерции ее. Работа лампы достигает нормального режима минимум через 40 мин., и только по истечении этого срока непрерывное падение эмиссии, вызванное увеличением сопротивления нити накала, не обнаруживается.

На рис. 11 дана кривая изменения анодного тока в зависимости от промежутка времени, протекшего от момента включения лампы.

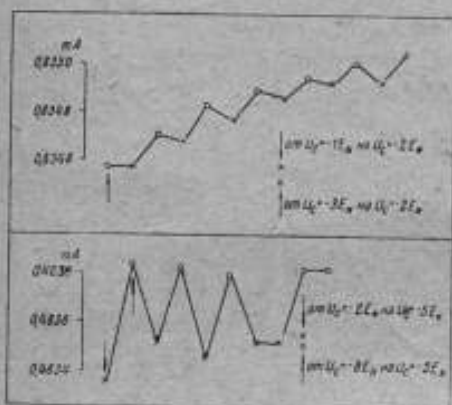


Рис. 9. и 10.

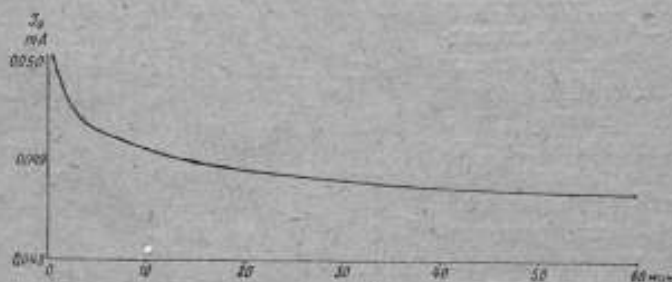


Рис. 11.

Итак, из приведенного материала можно сделать ряд заключений о мерах, которые должны быть приняты при применении для метрологических целей ламп с чистой вольфрамовой нитью, и о достижимой точности измерений. Лампы должны применяться хорошо эвакуированные. Предварительное их испытание настоятельно необходимо. Батарея накала должна быть емкостью не менее 200—300 ампер-часов, включать ее следует по крайней мере за 40 мин. до начала измерений. Должны быть приняты меры для поддержания постоянства температуры в лабо-

рагории и в аккумуляторном помещении. Все аккумуляторные батареи должны работать на горизонтальных участках их характеристик. Потенциал на сетку при снятии характеристик лучше подавать от нормальных элементов. Для исключения влияния инерции изменения анодного тока<sup>2</sup> следует снимать характеристику дважды — при возрастающем и убывающем анодном токе, изменяя потенциал на сетке равными интервалами как при ходе в одну, так и в другую сторону.

Достижимая точность воспроизведения характеристики при соблюдении этих условий может быть получена порядка 0,05% в рабочей части характеристики.

*Ленинград, ВИМС. Лаборатория переменного тока*

SUR LA POSSIBILITÉ DE L'EMPLOI D'UN TUBE À  
TROIS ÉLECTRODES POUR LA MESURE DE LA TENSION  
AVEC UNE PRÉCISION ÉLEVÉE

Par A. A. Tchetchouline

(Résumé)

Les études des tubes à trois électrodes aux filaments, de tungstène ont démontré la possibilité de l'application de ces lampes aux buts métrologiques. On a déterminé les courbes des tubes dans différentes conditions. Étant donné que la précision voulue des mesures doit être 0,05%, on a trouvé que la stabilité du fonctionnement des tubes n'est possible qu'aux conditions suivantes: la capacité de la batterie du filament doit être au moins 200—300 Ah, la température de l'appartement doit être constante et la mise en circuit doit avoir lieu 40 min. avant le commencement des mesures. Pour avoir les meilleurs résultats la tension préliminaire négative de la grille doit être produite par une série d'éléments normaux.

Les mesures faites par le voltmètre à tube doivent avoir lieu à la partie inférieure de la courbe caractéristique. On a constaté que le changement du courant de la plaque a une "inertie de changement du courant". La courbe caractéristique prise en élevant le courant a des valeurs plus hautes que celles de la courbe prise en le diminuant.



## ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ЛАМПОВОГО ВОЛЬТМЕТРА И ПОТЕНЦИОМЕТРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. А. Чечулин

В лаборатории переменного тока ВИМСа, в порядке опыта, для определения коэффициента самоиндукции катушки без железа и емкости конденсатора был произведен ряд измерений реактивных сопротивлений при помощи лампового вольтметра и потенциометра постоянного тока.

В статье этого сборника „О возможности применения электронных ламп для измерений напряжения с повышенной

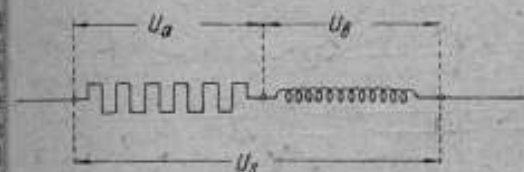


Рис. 1.

точностью даны условия наибольшей стабилизации работы лампы, а следовательно, указаны пути, следуя которым, возможно заменить измерения на переменном токе измерениями на потенциометрах постоянного тока. От этой замены можно ожидать повышения точности всех измерений, обычно выполняемых на потенциометрах переменного тока, точность которых не превышает  $0,2\%$ .

Коэффициент самоиндукции и емкость конденсатора измерялись по способу трех вольтметров. В цепь, составленную из измеряемого объекта (катушки самоиндукции или конденсатора) и соединенного последовательно с ним образцового сопротивления, включался переменный ток технической частоты. Геометрическая сумма падений напряжения на образцовом сопротивлении  $U_a$  и на катушке самоиндукции  $U_b$  равна падению напряжения на всем участке цепи  $U_s$  и, следовательно, полное сопротивление всего участка, полное сопротивление катушки самоиндукции и образцовое безъемкостное и безиндукционное сопротивление образуют замкнутый треугольник (рис. 1 и 2). Три стороны

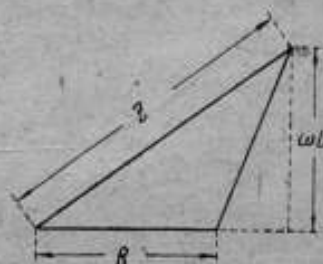


Рис. 2.

треугольника напряжений определяются измерением. По известному образцовому сопротивлению могут быть вычислены стороны треугольника сопротивлений. Решая треугольник по трем сторонам, можно найти реактивное сопротивление катушки самоиндукции  $\omega L$  или емкостное сопротивление конденсатора  $\frac{1}{\omega C}$ . По этим величинам, зная частоту, не трудно вычислить коэффициент самоиндукции катушки  $L$  или емкость конденсатора  $C$ .

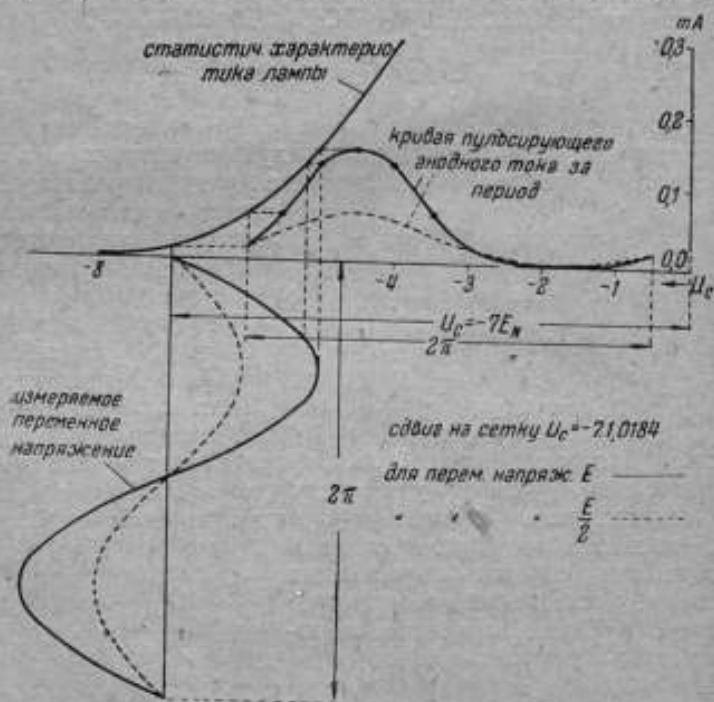


Рис. 3.

Наиболее выгодным в отношении точности измерений будет такое соотношение сторон, при котором образцовое и исследуемое сопротивления будут одного порядка. Этому условию удовлетворить легко при наличии большого набора образцовых сопротивлений. Таким образом, этот метод применим в широких пределах измеряемых величин, если активные составляющие сопротивлений невелики.

При опытных измерениях коэффициента самоиндукции и емкости конденсатора падения напряжения измерялись при помощи лампового вольтметра с анодным детектированием.

Как известно, принцип работы этого прибора заключается в следующем. Между сеткой и нитью накала включается измерительный прибор.

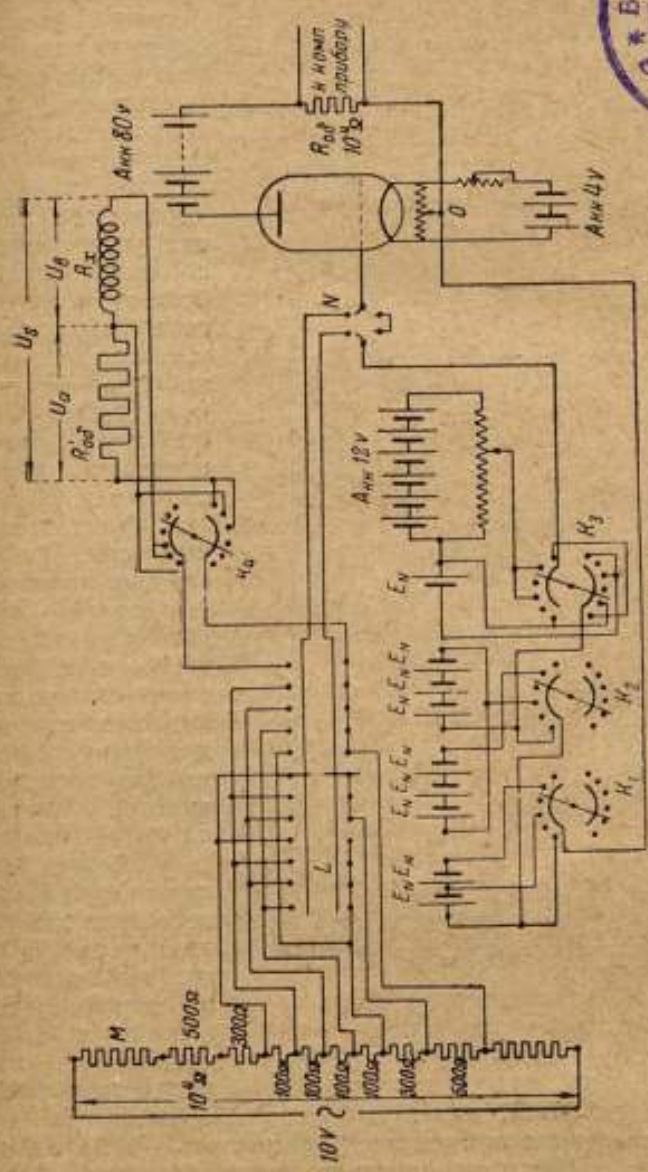


Рис. 4.

емое переменное напряжение. На сетку предварительно подается отрицательный постоянный потенциал, соответствующий точке нижнего перегиба характеристики. Приложенное переменное напряжение за один полу-

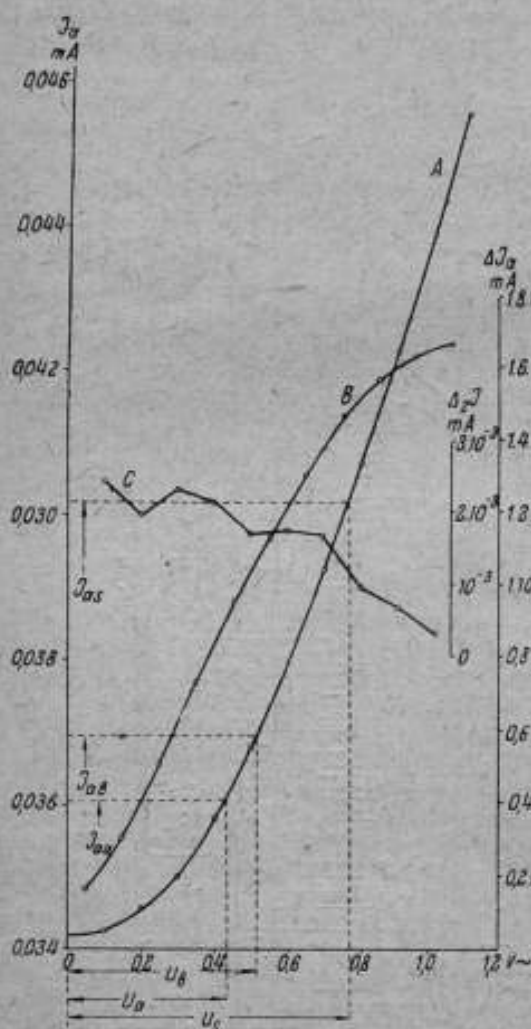


Рис. 5.

1,4 вольт (сплошная линия) и 0,7 вольт (пунктир).

При измерениях применялась лампа типа П7. Катод накаливался током от батареи аккумуляторов напряжением 4 вольт и емкостью 1200 ампер-часов. В анодную цепь была включена батарея аккумуляторов напряжением 80 вольт и емкостью 2,5

пряжения за один полу- период увеличивает анодный ток и за второй уменьшает, причем уменьшение анодного тока значительно меньше увеличения. Таким образом, приложенное переменное напряжение увеличивает силу анодного тока. При работе на верхнем перегибе характеристики т. е. при предварительно поданном на сетку потенциале, соответствующем верхнему перегибу, включение переменного напряжения уменьшает анодный ток. Работа на верхнем перегибе, хотя и позволяет оперировать с большим по абсолютной величине анодным током, оказывается непригодной для точных измерений, так как непостоянство эмиссии лампы в этом случае проявляется резко. На рис. 3 показан нижний участок характеристики электронной лампы типа П7 и график анодного тока за один период приложенного к сетке синусоидального переменного напряжения около

ампер-часа. Предварительное отрицательное смещение на сетку подавалось либо от батареи из 9 нормальных элементов, либо от батареи аккумуляторов напряжением 12 вольт и емкостью 60 ампер-часов.

Схема включения показана на рис. 4. При помощи переключателей на 6 направлений  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  можно было подавать отрицательный потенциал на сетку либо от 0 до 9-кратного напряжения нормального элемента, либо любой потенциал до 12 вольт от аккумуляторной батареи. Схема предусматривала возможность включения обеих батарей последовательно. При помощи переключателя  $N$  (паука) последовательно со смещающими батареями подавалось переменное напряжение от переключателя на 12 направлений  $L$ . Положительный полюс смещающей батареи и отрицательный анодной батареи приключались к точке  $O$ , потенциал которой был равен потенциалу средней точки нити накала. К точке  $O$  была приключена средняя точка реостата сопротивлением 5000 ом, включенного параллельно нити накала.

Переменное напряжение при градуировке вольтметра подавалось через 11 пар контактов переключателя  $L$  от делителя напряжения  $M$ , сопротивление которого было  $10^4$  омов.

К этому делителю подавалось напряжение около 10 вольт. Измеряемое напряжение подавалось через переключатель  $K_4$  к 12-й паре контактов переключателя  $L$ . Анодный ток измерялся на потенциометре Tinsley-Drysdale. В анодную цепь было включено образцовое сопротивление  $10^4$  омов.

Так как абсолютное значение переменного напряжения для расчета реактивного сопротивления знать не нужно, градуировка

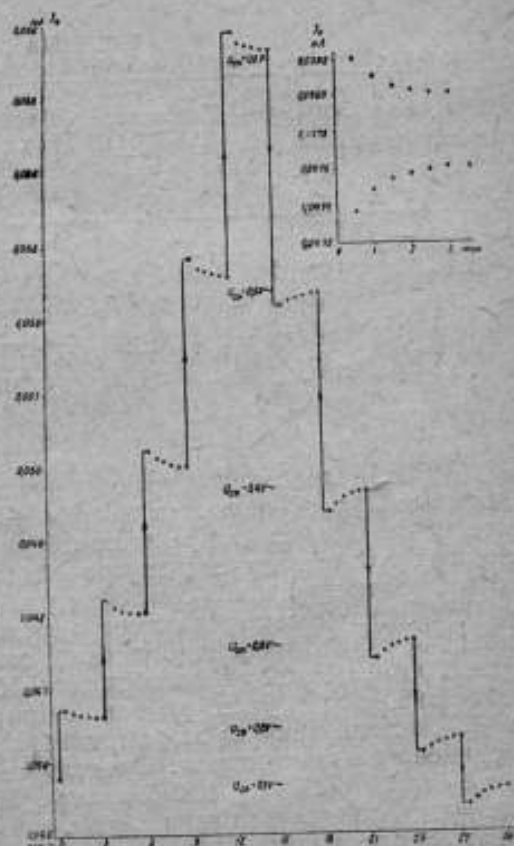


Рис. 6.

вольтметра производилась в условных единицах приблизительно через 0,1 вольта. За время измерения напряжение, поданное к делителю  $M$ , поддерживалось неизменным.

Результаты градуировки вольтметра (в условных вольтах) на переменном токе при отрицательном сдвиге на сетке 8,7217 V приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

Переменное напряжение в V	Анодный ток в $\mu$ A	Переменное напряжение в V	Анодный ток в $\mu$ A	Переменное напряжение в V	Анодный ток в $\mu$ A
0	0,034170	0,4	0,035786	0,8	0,040629
0,1	0,034231	0,5	0,036739	0,9	0,042195
0,2	0,034541	0,6	0,037862	1,0	0,043829
0,3	0,035048	0,7	0,039161	1,1	0,045495

На рис. 5 приведены: градуированная кривая (A) вольтметра и кривые (B и C) первых и вторых разностей анодных токов на интервал в 0,1 вольта. На этом же рисунке показаны значения анодных токов, полученные при одном из нескольких опытных измерений коэффициента самоиндукции катушки.

При градуировке вольтметра резко было заметно явление „инерции изменения анодного тока“, описанное в упомянутой уже статье, помещенной в этом сборнике. На рис. 6 дан график изменения анодного тока со временем при работе с двухсеткой типа ДРС. Управляющей была катодная сетка. Анодная сетка была соединена с нитью накала. Предварительный сдвиг на катодной сетке был дан  $U_c = -1,9292$  вольта. По оси ординат дано значение анодного тока в микроамперах, а по оси абсцисс — время в минутах. Вертикальные прямые соответствуют моментам изменения переменного напряжения на 0,1 вольта. В правом верхнем углу показано изменение анодного тока в течение 3 мин. с интервалами через  $\frac{1}{2}$  мин. после увеличения (верхняя кривая) и уменьшения (нижняя кривая) измеряемого напряжения на 0,1 вольта. Из приведенных кривых следует, что анодный ток устанавливается после переключения напряжения только через промежуток времени, не меньший 3 мин. Кроме того, из графика видно, что абсолютное значение анодного тока при увеличении напряжения на сетке всегда выше, чем при уменьшении. Таким образом, характеристика вольтметра при измерениях в направлении увеличения анодного тока будет лежать выше, чем при уменьшении.

Это обстоятельство позволяет рекомендовать при аналогичных измерениях поступать следующим образом. Снять характеристику и произвести измерения первый раз ориентировочно для выяснения интервала, на который придется измеряемая величина. После этого повторить как градуировку, так и измерения с отсчетом сразу же после переключения непременно в одном направлении возрастания или убывания анодного тока или дважды проделать эти измерения в обоих направлениях. В последнем случае в расчет ввести средние арифметические из полученных значений.

Обработка полученных описанным способом измерений падений напряжения на образцовом сопротивлении  $U_a$ , на исследуемом  $U_b$  и на всем участке  $U_c$  производилась аналитически. Графические методы в этом случае совершенно непригодны вследствие поставленной задачи произвести измерения с повышенной точностью.

Вычисление искомого коэффициента самоиндукции заключалось

в следующем. Были известны полученные измерением значения анодного тока при переменных напряжениях от 0,3 до 0,9 вольта (7 значений) и при искомых напряжениях  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ . Число точек градуировки выбиралось с таким расчетом, чтобы ниже наименьшего и выше наибольшего из искомых было по одному полному интервалу. По 7 значениям анодного тока, при известных напряжениях на сетке, по способу наименьших квадратов вычислялись коэффициенты уравнения характеристики как кривой 3-го порядка. При подстановке в это уравнение известных потенциалов и соответствующих им анодных токов получались погрешности, каковые распределялись по сторонам вычисленной кривой во всех случаях совершенно подобно. Из этого распределения вытекало, что экспериментальная и вычисленная кривые пересекаются в рабочей части четыре раза, как это схематически изображено на рис. 7. Условная экспериментальная кривая изображена на рис. 7 пунктиром и вычисленная — сплошной линией. На рис. 8

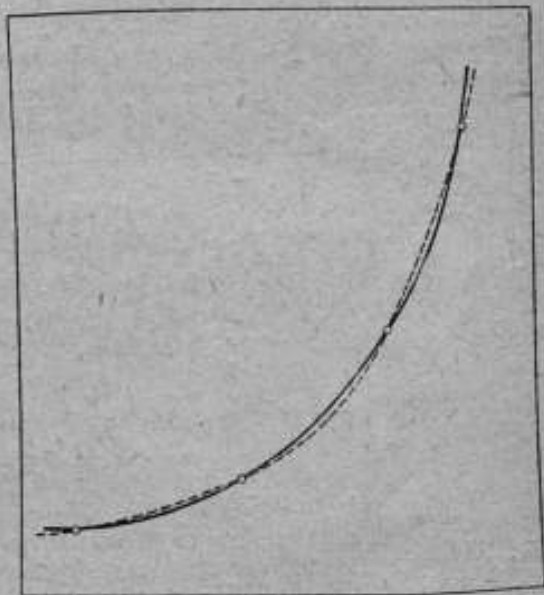


Рис. 7.

показано распределение погрешностей по данным 4-го измерения из приведенных в табл. 2 (см. ниже). По оси абсцисс отложены значения напряжения, а по оси ординат — погрешности. Кривая рис. 8 позволяет перед вычислением неизвестных напряжений внести в значения соответствующих им анодных токов поправки на расхождение экспериментальной и вычисленной кривой. Путем

$\Delta I_a$   
 $10^{-6} \text{ mA}$

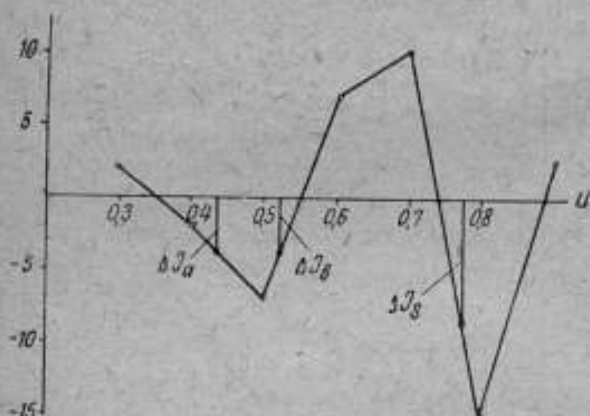


Рис. 8.

линейной интерполяции в соответствующих интервалах напряжения легко определить искомые значения  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$  и по этим величинам по кривой рис. 8 найти поправки для  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  и  $I_{a3}$ , т. е. для анодных токов при напряжении на сетке  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ .

В табл. 2 даны значения анодного тока при градуировке вольтметра и при измерении величин  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ .

В последней строчке даны результаты вычисления коэффициента самоиндукции одной и той же катушки. Эти данные приведены для шести измерений. Из сопоставления результатов можно сделать заключение о степени точности измерений по этому методу.

По результатам 4-го измерения для коэффициентов кривой 3-го порядка  $AU^3 + BU^2 + CU + D = I_a$  были получены следующие значения:

$$\begin{aligned} A &= -2,833, \\ B &= 136,845, \\ C &= -84,773, \\ D &= 34140. \end{aligned}$$

При расчете за единицу напряжения принималось 0,1 вольт и за единицу силы анодного тока  $10^{-6}$  миллиампера. По данным рис. 8 было получено  $\Delta I_a = -9$ ,  $\Delta I_b = -4$  и  $\Delta I_c = -4$ . Для искомым значений разности потенциалов было вычислено:

$$\begin{aligned} U_a &= 7,761, \\ U_b &= 5,243, \\ U_c &= 4,384. \end{aligned}$$



ТАБЛИЦА 2

Переменное напряжение на сетке в V	Анодный ток в $10^{-6}$ mA					
	1-е измере- ние	2-е измере- ние	3-е измере- ние	4-е измере- ние	5-е измере- ние	6-е измере- ние
0,3	34 990	34 959	35 039	35 039	35 067	35 012
0,4	35 761	35 723	35 800	35 812	35 828	35 755
$U_a$	36 120	36 081	36 139	36 160	36 169	36 102
0,5	36 754	36 696	36 773	36 790	36 797	36 742
$U_b$	36 980	36 962	37 023	37 049	37 030	36 988
0,6	37 886	37 848	37 911	37 939	37 913	37 879
0,7	39 228	39 203	39 245	39 271	39 230	39 216
$U_c$	40 393	40 268	40 400	40 400	40 382	40 362
0,8	40 767	40 755	40 745	40 785	40 729	40 734
0,9	42 379	42 369	42 339	42 391	42 340	42 340
Вычисленный коэф- фициент самоиндук- ции в pH . . . . .	18,04	18,15	18,13	18,19	18,10	18,20

Средняя квадратичная погрешность для кривой получалась

$$\bar{\Delta}_{\text{кв}} = \pm 8.$$

При аналогичных измерениях емкости одного и того же конденсатора были получены следующие значения:

$$C = 2,223 \mu\text{F}$$

$$C = 2,253 \mu\text{F}$$

$$C = 2,217 \mu\text{F}$$

$$C = 2,237 \mu\text{F}$$

Описанный метод измерений может быть признан достаточно надежным при наличии у лаборатории возможности поддерживать и контролировать частоту переменного тока с достаточно высокой точностью и при условии синусоидальной формы кривой переменного тока.

Первое из этих условий при описанных опытных измерениях было выполнено. Частота переменного тока контролировалась стробоскопическим методом с точностью до 0,002 герца. Второе же условие к сожалению выполнено быть не могло. Основной

генератор лаборатории переменного тока ВИМСа имеет вполне удовлетворительную форму кривой.

Из приведенных выше результатов измерений следует, что достижимая точность при определении коэффициентов самоиндукции и емкостей определяется величиной 0,1—0,05%. Область применения довольно широка и определяется набором образцовых сопротивлений. Повидимому этот метод пригоден для измерений очень больших емкостей без применения высокого напряжения. Для этой цели достаточно удовлетворительных методов не имеется. Применение описанного метода для измерений реактивных сопротивлений, несмотря на некоторую обширность требуемого оборудования и кропотливость вычислений, может быть оправдано возможностью применения его в широких пределах и достижимостью более высокой точности, так как непосредственные измерения производятся на потенциометрах постоянного тока.

*Ленинград, ВИМС, Лаборатория переменного тока*

sur  
3 vo  
d'un  
cha  
de  
dre  
de  
cal  
rés  
cot  
dan

LA MESURE DES RÉSISTANCES RÉACTIVES À L'AIDE D'UN  
VOLTÈMÈTRE À TUBES ET D'UN POTENTIOMÈTRE À COURANT  
CONTINU

Par A. A. Tchetchouline

(Résumé)

Le voltmètre à tube à trois électrodes a été appliqué à la mesure des résistances réactives, le schème adopté étant celui de 3 voltmètres. On faisait les mesures du courant de la plaque à l'aide d'un potentiomètre à courant continu. Le voltmètre était étalonné à chaque 0,1 de volt. Les équations de la courbe d'étalonnage (courbe de troisième ordre) étaient calculées par la méthode des moindres carrés des 7 points d'étalonnage. D'après l'intensité du courant de la plaque observée au moyen de la courbe d'étalonnage on avait calculé la perte de la tension aux bornes de raccordement de la résistance normale, de la résistance mesurée et des deux résistances couplées. Ces mesures donnaient la possibilité de trouver les impédances cherchées avec la précision de 0,1 à 0,05%.

МЕТОДЫ ПОВЕРКИ И ИСПЫТАНИЯ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ  
ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЛАБОРАТОРИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
ВИМСа

А. А. Павлова

Настоящая статья имеет целью познакомить с работами лаборатории постоянного тока ВИМСа в области поверки компенсационных аппаратов за период времени 1931—1932 гг.

Основываясь на многолетнем опыте, лаборатория пришла к заключению, что наиболее рациональный метод поверки компенсационных аппаратов — это метод сравнения показаний испытуемого аппарата с показаниями образцового: этот метод дает непосредственно поправки в вольтах для каждого показания испытуемого аппарата, не требует никаких вычислений и особенно удобен при массовой поверке компенсационных аппаратов.

Единственным и существенным недостатком этого метода является необходимость иметь образцовый компенсационный аппарат, т. е. такой, погрешности которого или лежат за пределами его точности, или известны и постоянны. В лаборатории постоянного тока ВИМСа имеются два таких компенсационных аппарата: типа Фейснера, изготовленный фирмой Вольт и типа „К“, изготовленный фирмой Лидс и Нортруп, поверенные вышеописанными способами и периодически (один раз в год) сравниваемые друг с другом. Поверка показала, что погрешности их не превосходят 0,1 значения последней ступени потенциометра, а сравнения ряда лет дали полное совпадение их показаний.

При испытании этих потенциометров лаборатория исходила из следующих соображений.

Рассмотрим принципиальную схему потенциометра (рис. 1).

$R$  — общее сопротивление потенциометра;

$R_1$  — часть общего сопротивления потенциометра, разность потенциалов на концах которого, при прохождении через потенциометр тока  $I$ , уравновешивается электродвижущей силой нормального элемента.

$R_x$  — часть общего сопротивления потенциометра, разность потенциалов на концах которого, при прохождении через потенциометр тока  $I'$ , уравновешивается измеряемой разностью потенциалов  $= x$ .

Если в процессе работы общее сопротивление потенциометра изменяется, то ток в основной потенциометрической цепи сохраняет постоянную величину, т. е.  $I = I'$  (считая, что напряжение батареи  $B$  и сопротивление внешней цепи постоянны).

$$\text{Тогда } x = E_N \frac{R_x}{R_e} \quad (1)$$

По этой формуле проверке подл...  
ит только отношение сопротивлений  
потенциометра  $\frac{R_x}{R_e}$ .

Существуют потенциометры, общее сопротивление которых остается постоянным в процессе работы, независимо от положения его переключателей, например потенциометры Франка и Вилле и Нортрупа.

В других потенциометрах сама конструкция допускает изменение общего сопротивления в процессе работы, как например в потенциометрах Рапса и Вольфа. Действительно, из рассмо-

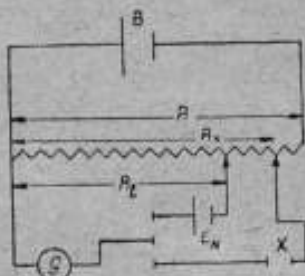


Рис. 1. Принципиальная схема потенциометра.

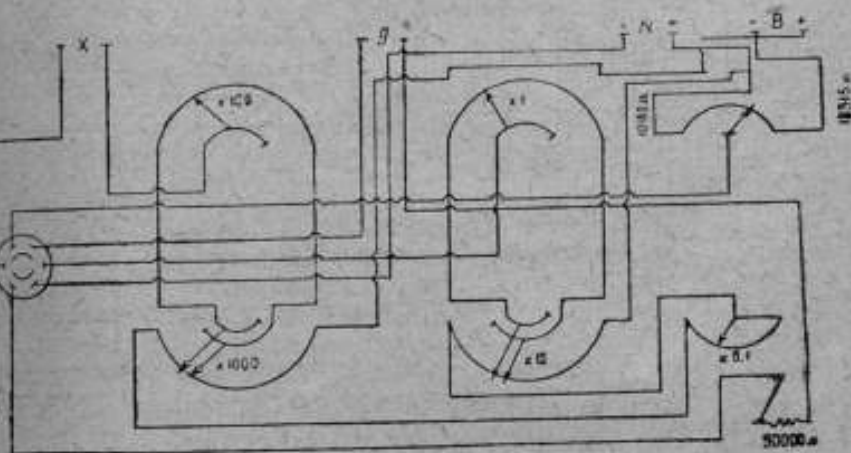


Рис. 2. Схема потенциометра Рапса.

строения принципиальных схем этих приборов видно: 1) в потенциометре Рапса (рис. 2) при передвижении рычага декады  $\times 0,1$  общее сопротивление цепи изменяется на величину от 0,1 до 1 ома в зависимости от положения этого рычага, причем это изменение ничем не компенсируется.

Влияние этого изменения общего сопротивления на показания потенциометра не превосходит 0,003% и практически им можно пренебречь.

Аналогичные изменения общего сопротивления могут место в потенциометрах Бруггера и Пасквалини, нетрудно убедиться при рассмотрении их схем.

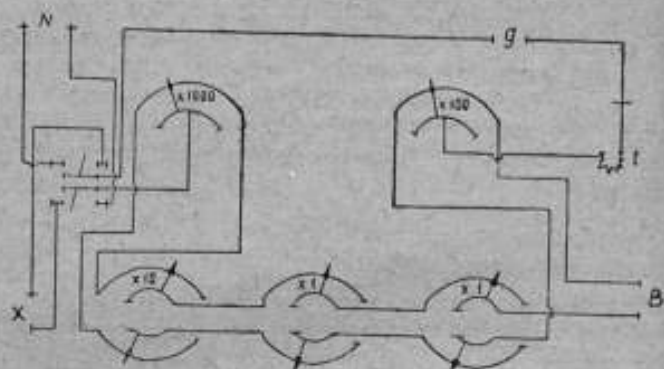


Рис. 3 Схема потенциометра Вольфа.

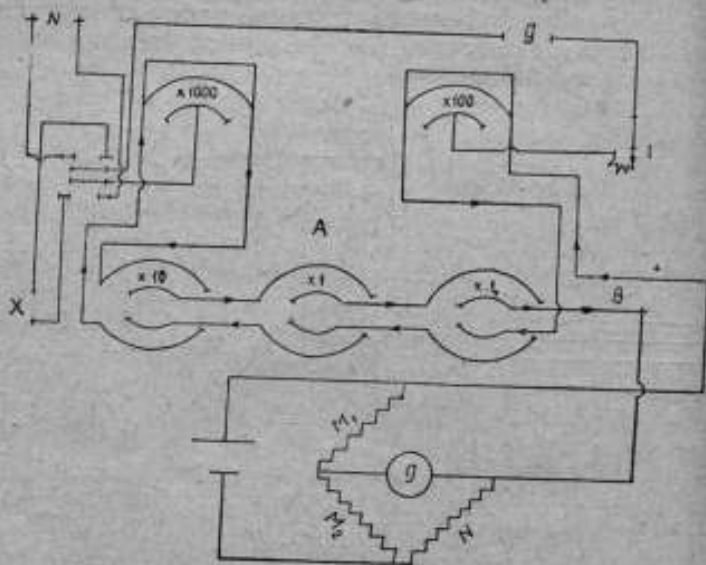


Рис. 4. Схема проверки сопротивлений катушек малых декад потенциометра Вольфа.

В потенциометре Вольфа при передвижении рычагов двойных декад (рис. 3) в цепь потенциометра вводятся различные катушки этих декад, что, при неточной подгонке их сопротивлений, может вызвать изменение общего сопротивления потенциометра.

Для проверки постоянства сопротивления двойных декад потенциометр включается в одно из плеч моста Витстона через

жмы „батарея“, причем все декады, кроме двойных, замкнуты коротко. При этом измеряемое сопротивление потенциометра равно сумме сопротивлений катушек двойных декад. Изменяя положение рукояток, т. е. вводя в цепь различные катушки декад, наблюдается происходящее при этом изменение сопротивления. При надежных контактах и неизменяемых соединительных проводах в мосте, происходящие в сопротивлении изменения вызываются исключительно неравенством сопротивлений ответственных катушек двойных декад (рис. 4).

#### ПОВЕРКА ОТНОШЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОМПЕНСАЦИОННОГО АППАРАТА

Для проверки отношений отдельных сопротивлений потенциометра в лаборатории постоянного тока применяются два метода.

Первый метод моста Витстона был применен при проверке потенциометра типа Фейснера, изготовленного фирмой Вольф, второй метод—сравнение величины отношения сопротивлений потенциометра с величиной отношения образцовых катушек сопротивлений—был применен при проверке потенциометра па „К“ фирмы Лидс и Нортруп.

Первый метод состоит в следующем: в одно плечо моста Витстона включается измеряемое сопротивление потенциометра, в два плеча включаются неизменные сопротивления—образцовые катушки сопротивления и магазины сопротивления, в четвертое плечо включается магазин, сопротивление которого подбирается так, чтобы мост был в равновесии. Изменяемое сопротивление потенциометра вычисляется по формуле уравновешенного моста Витстона.

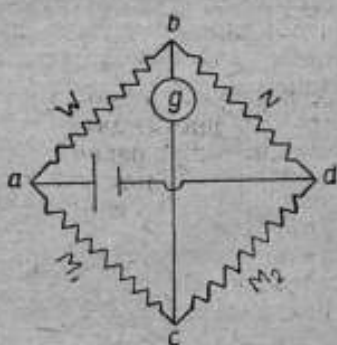


Рис. 5. Схема моста Витстона.

Схема моста (рис. 5):  $N$ —образцовое сопротивление,

$M_1$  и  $M_2$ —магазины сопротивления,

$W$ —сопротивление катушки потенциометра. Сопротивление магазина  $M_1$  постоянно и равно  $R_1$  омов. Сопротивление магазина  $M_2$  равно  $R_2 + a$  омов, где  $a$  подбирается так, чтобы мост был в равновесии.

Для первой катушки потенциометра имеем:

$$R_2^1 = R_2 \pm a_1.$$

По уравнению моста Витстона имеем:

$$\frac{W}{N} = \frac{R_1}{R_2^1}; \quad W = \frac{N \cdot R_1}{R_2^1}.$$

При измерении второй катушки потенциометра  $N$  остаются теми же, а сопротивление магазина  $R_2$  будет равно  $R_2'' = R_2 \pm a_2$ ; тогда: сопротивление второй катушки потенциометра

$$W'' = \frac{NR_1}{R_2''}.$$

Из этих данных вычисляем отношение сопротивлений между первой и второй катушек потенциометра:

$$\frac{W'}{W''} = \frac{NR_1}{R_2'} \cdot \frac{R_2''}{NR_1} = \frac{R_2''}{R_2'}.$$

при условии, что  $N$  и  $R_1$  в обоих измерениях остаются неизменными, так же как и соединительные проводники в мосте, а контакты достаточно надежны.

Для каждой катушки делаются два отсчета по шкале гальванометра, при избыточном и недостаточном сопротивлении магазина  $R_2$ , причем чувствительность гальванометра должна быть такова, чтобы при изменении сопротивления магазина  $R_2$  на 0,1 ома (меньше наименьшей декады магазина) получалось отклонение гальванометра в несколько делений шкалы для более точного отсчета. Из полученных двух отсчетов вычисляется сопротивление  $R_2$ , пригодное для равновесия моста.

При точности отсчета по шкале гальванометра в 0,1 деления величина этого сопротивления может быть вычислена с точностью до 0,01 ома, т. е. при  $R_1 = 1000$  омам — до 0,001%, что дает для отношения сопротивлений точность порядка 0,002% при условии, что сопротивление  $R_1 = R_2$ , а погрешность сопротивления магазина в 0,1 ома меньше 0,01 ома.

Таким же образом проверяются отношения сопротивлений между всеми катушками потенциометра, сопротивление которых должно быть того же порядка, но не ниже 10 омов. При малых сопротивлениях самих катушек потенциометра на результат измерения уже влияет сопротивление контактов, и именно сопротивление проводников, поджимаемых к пластинам декады потенциометра зажимными винтами, так как остальные контакты остаются постоянными и их влияние в окончательном расчете отношений сопротивлений исключается.

Влияние непостоянства контакта сказывается в десятых долях ома, благодаря чему величина отношения катушек сопротивления менее 10 омов может быть вычислена с точностью порядка 0,1%. Для исключения влияния непостоянного сопротивления контакта для проверки отношений сопротивлений катушек меньше 10 омов сопротивления, т. е. в 1 ом и 0,1 ома, можно воспользоваться схемой двойного моста Томсона (рис. 6).

В этой схеме:  $R_1, R_2, R_3, R_4$  — сопротивления моста,



$N$  — образцовая катушка сопротивления,

$W$  — катушка потенциометра.

Сопротивления  $R_1 = R_2$  постоянны. Сопротивления  $R_3 = R_4$  подбираются так, чтобы мост был в равновесии.  $N = 1$  ому при измерении катушек в 1 ом и  $N = 0,1$  ома при измерении катушек в 0,1 ома.

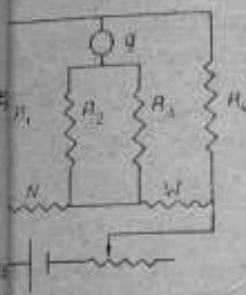


Рис. 6. Схема моста Томсона.

$$\frac{W}{N} = \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}; \quad W' = N \frac{R_3'}{R_1}; \quad W'' = N \frac{R_4''}{R_1},$$

где  $W'$  и  $W''$  — соответственно первая и вторая катушки потенциометра, откуда отношение сопротивлений второй катушки потенциометра к первой:  $\frac{W''}{W'} = \frac{R_4''}{R_3'}$ ; при этом величина отношения может быть вычислена с точностью до 0,01%, что для декад малого сопротивления вполне достаточно.

Второй метод проверки отношений сопротивлений потенциометра — метод сравнения отношений сопротивлений потенциометра с отношением сопротивлений образцовых катушек. Состоит он в следующем: составляется последовательная цепь из образцовых катушек сопротивления, число которых равно числу ступеней потенциометра, причем сопротивление каждой последующей катушки в десять раз меньше сопротивления предыдущей (например 1000 ом; 100 ом; 10 ом; 1 ом; 0,1 ома), аккумуляторной батареи и регулируемого реостата.

Через многополюсный переключатель потенциальные зажимы образцовых катушек сопротивлений присоединяются к зажимам "X" потенциометра (рис. 8). В потенциометре устанавливается основной потенциометрический ток  $I_1$ . Ток  $I_1$

в цепи образцовых катушек сопротивлений регулируется реостатом так, чтобы разность потенциалов на концах образцовой катушки с наибольшим сопротивлением, например в 1000 ом, уравни-

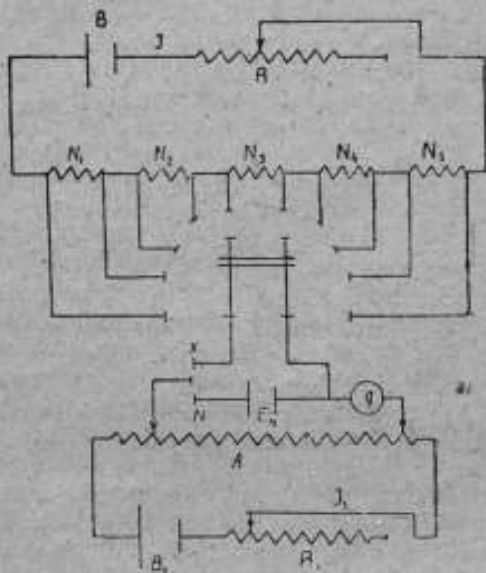


Рис. 7. Схема проверки потенциометра Leeds & Northrup.

вешивалась разностью потенциалов на зажимах „X“ потенциометра, когда в цепь „X“ потенциометра введено одно из сопротивлений наибольшей декады.

Разности потенциалов на зажимах остальных образцовых катушек сопротивлений измеряются потенциометром.

$U_1 = r_1 I_1 = R_{N1} \cdot I$ ;  $U_2 = r_2 I_1 = R_{N2} \cdot I$ ;  $U_3 = r_3 I_1 = R_{N3} \cdot I$ ; ...  $U_n = r_n I_1 = R_{Nn} \cdot I$ , где  $n$  — число ступеней потенциометра.

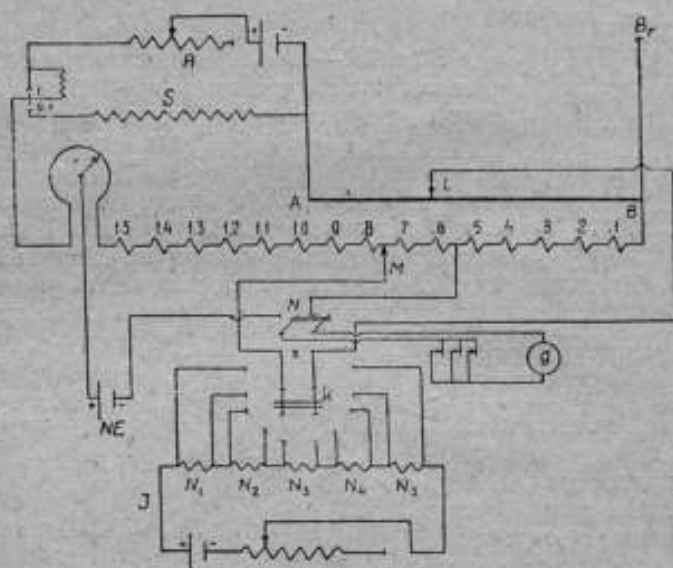


Рис. 8. Схема потенциометра Leeds & Northrup.

Здесь:

$U_n$  — показания потенциометра,

$r_1, r_2, \dots, r_n$  — соответствующие этим показаниям сопротивления потенциометра,

$R_{N1}, R_{N2}, \dots, R_{Nn}$  — действительные значения сопротивлений образцовых катушек.

$$\frac{r_2 I_1}{r_1 I_1} = \frac{R_{N2} I}{R_{N1} I}; \quad \frac{r_2}{r_1} = \frac{R_{N2}}{R_{N1}}; \quad \frac{r_3 I_1}{r_1 I_1} = \frac{R_{N3} I}{R_{N1} I}; \quad \frac{r_3}{r_1} = \frac{R_{N3}}{R_{N1}};$$

$$\frac{r_n I_1}{r_1 I_1} = \frac{R_{Nn} I}{R_{N1} I}; \quad \frac{r_n}{r_1} = \frac{R_{Nn}}{R_{N1}}.$$

Зная действительные значения сопротивлений образцовых катушек сопротивлений, которые известны с точностью до 0,0001 вычисляются действительные значения отношений  $\frac{R_{N2}}{R_{N1}}$ ;  $\frac{R_{N3}}{R_{N1}}$  и т. п., которые равны соответственно отношениям сопротивлений потенциометра:  $\frac{r_2}{r_1}$ ;  $\frac{r_3}{r_1}$  и т. д., плюс или минус не-

торые малые величины, которые и представляют собою поправки отношений сопротивлений потенциометра, т. е.

$$\frac{R_{N_2}}{R_{N_1}} = \frac{r_2}{r_1} \pm \alpha_1; \quad \frac{R_{N_3}}{R_{N_1}} = \frac{r_3}{r_1} \pm \alpha_2 \text{ и т. д.}$$

Схема соединений — см. рис. 7.

В этой схеме  $N_1; N_2; N_3; N_4; N_5$  — образцовые катушки сопротивления,  $B$  и  $B_1$  — аккумуляторные батареи,  $A$  — потенциометр,  $R$  и  $R_1$  — регулировочные реостаты,  $G$  — гальванометр,  $E_N$  — нормальный элемент.

ПОВЕРКА ПОТЕНЦИОМЕТРА ТИПА ФЕЙССНЕРА, ФИРМЫ ВОЛЬФ

а) Поверка отношений сопротивлений потенциометра.

Катушки в 1000 омов.

Схема соединений представлена на рис. 5. Теперь  $W$  — катушка потенциометра в 1000 омов,  $N$  — образцовая катушка сопротивления в 1000 омов,  $M_1$  и  $M_2$  — магазины сопротивления.

Проводники, присоединяющие  $W, N, M_1$  и  $M_2$  к точкам  $a, b, c, d$ , берутся одинаковой длины и одинакового поперечного сечения.

В нижеследующей таблице  $R_1$  — сопротивление магазина  $M_1$ ,  $R_N$  — сопротивление образцовой катушки сопротивления,  $R_2$  — сопротивление магазина  $M_2$ ,  $n$  — отклонение гальванометра в делениях шкалы,  $R_2^{(n)}$  — сопротивление магазина  $M_2$  в уравновешенном мосте,  $\frac{W^{(I)}}{W^{(II)}} = \frac{R_2^{(n)}}{R_2^{(I)}}$  — отношение сопротивлений катушек потенциометра.

ТАБЛИЦА НАБЛЮДЕНИЙ

Декада  $\cdot \times 1000^*$

Порядковые №№ катушек потенц.	$R_1$	$R_N$	$R_2$	$n$	$R_2^{(n)}$	$\frac{W^{(I)}}{W^{(II)}} = \frac{R_2^{(n)}}{R_2^{(I)}}$	Погрешность отношения в проц.
1	1000	1000	1000,4 1000,5	-0,7 +3,4	1000,42	1,00000	0
2	1000	1000	1000,4 1000,5	-2,0 +2,1	1000,45	1,00003	0,003
3	1000	1000	1000,3 1000,4	-1,0 +3,0	1000,32	0,99991	0,009

Порядковые №№ катушек потенц.	$R_1$	$R_N$	$R_2$	$n$	$R_2^{(n)}$	$\frac{W^{(I)}}{W^{(II)}} = \frac{R_2^{(n)}}{R_2^{(I)}}$	Погрешность поправок в проц.
4	1000	1000	1000,4 1000,5	-1,8 +2,4	1000,44	1,00002	0,002
5	1000	1000	1000,5 1000,4	+2,3 -1,7	1000,44	1,00002	0,002
6	1000	1000	1000,4 1000,5	-1,3 +2,8	1000,43	1,00001	0,001
7	1000	1000	1000,5 1000,4	+0,6 -6,2	1000,41	0,99999	0,001
8	1000	1000	1000,4 1000,3	+0,7 -6,0	1000,39	0,99997	0,001
9	1000	1000	1000,3 1000,4	-4,9 +1,9	1000,37	0,99995	0,001
10	1000	1000	1000,4 1000,5	-2,9 +4,0	1000,44	1,00002	0,002
11	1000	1000	1000,4 1000,3	-1,8 +5,0	1000,37	0,99995	0,001
12	1000	1000	1000,3 1000,4	+6,2 0	1000,40	0,99998	0,002
13	1000	1000	1000,4 1000,5	+5,0 -1,8	1000,47	1,00005	0,005
14	1000	1000	1000,5 1000,4	+5,0 -1,8	1000,43	1,00001	0,001

Катушки в 100 омов.

Схема соединений представлена на рис. 5, где  $W$  — катушка потенциометра в 100 омов,  $N$  — катушка образцового сопротивления в 1000 омов,  $M_1$  и  $M_2$  — магазины сопротивления.

ТАБЛИЦА НАБЛЮДЕНИЙ

Декада  $\cdot \times 100^{\circ}$

Порядковые №№ катушек потенци.	$R_1$	$R_N$	$R_2$	$n$	$R_2^{(n)}$	$\frac{W^{(1)}}{W^{(n)}} = \frac{R_2^{(n)}}{R_2^{(1)}}$	Погрешность отношения в проц.
1	100	1000	1000,7	-1,0	1000,72	1,00000	0
			1000,8	+4,2			
2	100	1000	1000,7	+0,9	1000,68	0,99996	0,004
			1000,6	-4,1			
3	100	1000	1000,8	+2,5	1000,75	1,00003	0,003
			1000,7	-2,4			
4	100	1000	1000,7	-4,0	1000,78	1,00006	0,006
			1000,8	+0,9			
5	100	1000	1000,8	+1,6	1000,77	1,00005	0,005
			1000,7	-3,2			
6	100	1000	1000,7	+3,0	1000,64	0,99992	0,008
			1000,6	-2,0			
7	100	1000	1000,8	+2,9	1000,74	1,00002	0,002
			1000,7	-2,2			
8	100	1000	1000,7	+0,7	1000,69	0,99997	0,003
			1000,6	-4,2			
9	100	1000	1000,7	-3,0	1000,75	1,00004	0,004
			1000,8	+2,0			

Проверка отношений сопротивлений катушек потенциометра в 10 омов (рис. 5).

$W$  — катушка потенциометра в 10 омов,  $N$  — образцовая катушка сопротивления в 10 омов,  $M_1$  и  $M_2$  — магазины сопротивления.

## ТАБЛИЦА НАБЛЮДЕНИЙ

Декада  $\cdot \times 10^4$ 

Порядковые №№ катушек по- тенциометра	$R_1$	$R_N$	$R_2$	$n$	$R_2^{(n)}$	$\frac{W^{(1)}}{W^{(n)}} = \frac{R_2^{(n)}}{R_2^{(1)}}$	Погреш- ность отно- шения в процентах
1	1000	10	999,7	+ 2,0	999,72	1,00000	0
			999,8	- 8,5			
2	1000	10	999,7	- 4,0	999,66	0,99994	0,006
			999,6	+ 5,9			
3	1000	10	999,7	+ 0,5	999,75	1,00003	0,003
			999,8	- 10,0			
4	1000	10	999,7	- 8,3	999,62	0,99990	0,010
			999,6	+ 1,9			
5	1000	10	999,7	- 3,0	999,67	0,99995	0,005
			999,6	+ 7,3			
6	1000	10	999,6	+ 8,6	999,68	0,99996	0,006
			999,7	- 2,0			
7	1000	10	999,7	+ 1,2	999,71	0,99999	0,001
			999,8	- 9,1			
8	1000	10	999,8	- 7,8	999,72	1,00000	0
			999,7	+ 2,5			
9	1000	10	999,7	- 7,9	999,63	0,99991	0,009
			999,6	+ 3,2			

## ТАБЛИЦА НАБЛЮДЕНИЙ

Декада  $\cdot \times 1^*$ 

Порядковые №№ катушек потенциометра	$R_1 = R_2$	$R_4 = R_0$	$n$	$R_4^{(n)}$	$\frac{W^{(n)}}{W^{(1)}} = \frac{R_4^{(n)}}{R_4^{(1)}}$	Погрешность отношения в процентах
1	100	100,1 100,0	+ 5,0 - 2,5	100,03	1,0000	0
2	100	100,1 100,0	+ 2,8 - 4,4	100,05	1,0003	0,03
3	100	100,1 100,0	+ 2,8 - 4,5	100,05	1,0003	0,03
4	100	100,1 100,0	+ 3,3 - 3,8	100,05	1,0002	0,02
5	100	100,1 100,0	+ 5,2 - 2,4	100,03	1,0000	0
6	100	100,1 100,0	+ 4,5 - 3,0	100,04	1,0001	0,01
7	100	100,1 100,0	+ 3,5 - 4,2	100,04	1,0001	0,01
8	100	100,1 100,0	+ 2,5 - 4,7	100,06	1,0003	0,03
9	100	100,1 100,0	+ 3,2 - 4,0	100,06	1,0003	0,03

## ТАБЛИЦА НАБЛЮДЕНИЙ

Декада  $\cdot \times 0,1^*$ 

1	100	100,8 100,9	- 8,4 + 10,0	100,84	1,000	0
2	100	101,3 101,4	- 3,6 + 15,2	101,32	1,005	0,5
3	100	101,3 101,4	- 15,0 + 4,4	101,38	1,005	0,5
4	100	101,0 100,9	+ 10,5 - 9,5	100,94	1,001	0,1
5	100	101,0 100,9	+ 3,3 - 16,0	100,98	1,001	0,1
6	100	101,1 100,9	+ 18,0 - 18,3	101,00	1,002	0,2
7	100	101,1 101,0	+ 10,6 - 8,8	101,05	1,002	0,2
8	100	101,1 101,0	+ 9,8 - 11,0	101,06	1,002	0,2
9	100	101,1 101,0	+ 10,8 - 8,5	101,04	1,002	0,2

б) Проверка постоянства сопротивления  
двойных декад

Потенциометр включается в мост Витстона, как указано на чертеже № 4, и при всех возможных положениях указателей двойных декад, для каждого положения измеряется общее сопротивление двойных декад.

ТАБЛИЦА НАБЛЮДЕНИЙ

Положение указателей	$R_N$	$R_1$	$R_2$	$n$	$R_1^{(n)}$	$R = R_N \frac{R_1^{(n)}}{R_2}$
00,0	100	999,2	1000	0	999,20	99,9200
10,0	100	999,2	1000	-1,0	999,190	99,9190
		991,1		+8,6		
20,0	100	991,1	1000	+9,1	999,197	99,9197
		999,2		-0,3		
30,0	100	999,2	1000	-0,5	999,195	99,9195
		999,1		+9,0		
40,0	100	999,1	1000	+9,8	999,200	99,9200
		992,2		0		
50,0	100	999,2	1000	+0,2	999,202	99,9202
		999,3		-9,4		
60,0	100	999,3	1000	-9,0	999,207	99,9207
		999,2		+0,7		
70,0	100	999,2	1000	+1,0	999,210	99,9210
		993,3		-8,8		
80,0	100	999,3	1000	-9,2	999,204	99,9204
		999,2		+0,4		
90,0	100	999,2	1000	+1,0	999,210	99,9210
		999,3		-8,7		
01,0	100	999,2	1000	-1,6	999,183	99,9183
		999,1		+8,0		
02,0	100	999,1	1000	+8,2	999,185	99,9185
		999,2		-1,4		
03,0	100	999,1	1000	+8,2	999,185	99,9185
		999,2		-1,5		
04,0	100	999,1	1000	+8,4	999,187	99,9187
		999,2		-1,3		
05,0	100	999,1	1000	+8,6	999,189	99,9189
		999,2		-1,1		
06,0	100	999,1	1000	+8,1	999,184	99,9184
		999,2		-1,5		
07,0	100	999,1	1000	+8,3	999,186	99,9186
		999,2		-1,3		
08,0	100	999,1	1000	+8,1	999,185	99,9185
		999,2		-1,5		



О  
В  
Р  
ОТ

Положе- ние ука- зателей	$R_N$	$R_1$	$R_2$	$n$	$R_1^{(n)}$	$R = R_N \frac{R_1^{(n)}}{R_2}$
00,0	100	999,1 999,2	1000	+ 7,8 - 1,9	999,180	99,9180
00,1	100	999,1 999,2	1000	+ 8,0 - 1,7	999,182	99,9182
00,2	100	999,1 999,2	1000	+ 8,1 - 1,5	999,184	99,9184
00,3	100	999,2 999,1	1000	- 1,3 + 8,2	999,186	99,9186
00,4	100	999,1 999,2	1000	+ 8,3 - 1,3	999,186	99,9186
00,5	100	999,1 999,2	1000	+ 8,1 - 1,6	999,184	99,9184
00,6	100	999,1 999,2	1000	+ 8,0 - 1,6	999,183	99,9183
00,7	100	999,1 999,2	1000	+ 8,0 - 1,5	999,184	99,9184
00,8	100	999,1 999,2	1000	+ 8,0 - 1,7	999,182	99,9182
00,9	100	999,1 999,2	1000	+ 7,9 - 1,8	999,181	99,9181
99,9	100	999,3 999,2	1000	- 9,3 + 0,2	999,202	99,9202

Наименьшее сопротивление получается при положении указателей 00,9 — сопротивление равно 99,9181 ома; наибольшее сопротивление при положении указателей: 70,0 и 90,0 — сопротивление равно 99,921 ома. Наибольшее расхождение в значении сопротивления равно 99,9210 — 99,9181 = 0,0029 ома, что составляет 0,003% от величины измеряемого сопротивления, что лежит за пределами точности компенсационного прибора, так что общее сопротивление двойных декад при любых положениях указателей можно считать постоянным.

Вышеприведенные таблицы наблюдений показывают, что все погрешности потенциометра лежат за пределами его точности, так что практически при измерениях потенциометром его поправками можно пренебрегать.

**ПОВЕРКА ПОТЕНЦИОМЕТРА ТИПА „К“ ФИРМЫ LEEDS & NORTHRUP**

Составляется последовательная цепь из пяти образцовых катушек сопротивления  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  в 1000, 100, 10, 1 и 0,1 ома, соответственно пяти ступеням потенциометра (шестой знак

берется на глаз и в поверке не нуждается), аккумуляторной батареи и регулировочного реостата, как указано на чертеже (рис. 1). Потенциальные зажимы образцовых катушек сопротивления через многополюсный переключатель  $K$  присоединяются к зажимам  $X$  потенциометра. В потенциометре устанавливается основной ток в потенциометрической цепи при помощи нормального элемента. К зажимам  $X$  потенциометра присоединяются потенциальные зажимы образцовой катушки в 1000 омов, для чего переключатель  $K$  ставится в положение „1“. Переключатель  $M$  потенциометра ставится в положение „1,5“ при нулевом положении скользящего по реохорду контакта  $L$ . Реостатом  $R$  ток в цепи образцовых катушек регулируется до тех пор, пока не настанет равновесие между разностью потенциалов на зажимах катушки в 1000 омов и на зажимах  $X$  потенциометра.

Ток  $I$  все время поддерживается постоянным; для этого проверяется равновесие между разностью потенциалов на зажимах катушки в 1000 омов и на зажимах  $X$  потенциометра при основном токе в потенциометрической цепи и при положении указателя на „1,5“ вольта. Разности потенциалов на зажимах образцовых катушек сопротивления в 100; 10; 1 и 0,1 ома измеряются потенциометром.

В результате измерений имеем:

$$\begin{aligned} 1000 \Omega \cdot I A &= 1,5 = U_1, \\ 100 \Omega \cdot I A &= 0,15 \pm \alpha_1 = U_2, \\ 10 \Omega \cdot I A &= 0,015 \pm \alpha_2 = U_3, \\ 1 \Omega \cdot I A &= 0,0015 \pm \alpha_3 = U_4, \\ 0,1 \Omega \cdot I A &= 0,00015 \pm \alpha_4 = U_5. \end{aligned}$$

где правые части равенств представляют собою отсчеты на потенциометре, выраженные в вольтах.

Поставив переключатель  $M$  в положение „1,4“ при нулевом положении контакта  $L$ , устанавливают равновесие между разностью потенциалов на зажимах катушки в 1000 омов и разностью потенциалов на зажимах „ $X$ “ потенциометра при основном токе в потенциометрической цепи.

Получаем вторую серию наблюдений:

$$\begin{aligned} 1000 \Omega \cdot I A &= 1,4, \\ 100 \Omega \cdot I A &= 0,14 \pm \alpha'_1, \\ 10 \Omega \cdot I A &= 0,014 \pm \alpha'_2, \\ 1 \Omega \cdot I A &= 0,0014 \pm \alpha'_3, \\ 0,1 \Omega \cdot I A &= 0,00014 \pm \alpha'_4. \end{aligned}$$

Произведя такие же измерения при начальных положениях переключателя  $M$  на 1,3; 1,2 и т. д., получаем следующую таблицу наблюдений.

Образцовые катушки сопротивления

1000	100	10	1	0,1
Показания потенциометра				
$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
1,5	0,14994	0,01500	0,00150	0,00016
1,4	0,13994	0,01400	0,00140	0,00015
1,3	0,12994	0,01300	0,00129	0,00014
1,2	0,11994	0,01199	0,00120	0,00012
1,1	0,10995	0,01100	0,00110	0,00012
1,0	0,09994	0,10000	0,00100	0,00011
0,9	0,08994	0,00900	0,00090	0,00009
0,8	0,07995	0,00800	0,00080	0,00008
0,7	0,06996	0,00699	0,00070	0,00008
0,6	0,05996	0,00599	0,00060	0,00007
0,5	0,04998	0,00500	0,00050	0,00006

Действительные значения сопротивлений образцовых катушек соответственно равны:

$$R_{1000} = 1000,66 \text{ ома}; \quad R_{100} = 100,008 \text{ ома}; \quad R_{10} = 10,00043 \text{ ома};$$

$$R_1 = 1,00013 \text{ ома}; \quad R_{0,1} = 0,099994 \text{ ома}.$$

Отношения сопротивлений образцовых катушек:

$$\frac{R_{100}}{R_{1000}} = \frac{100,008}{1000,66} = 0,999942 \approx 0,99994.$$

$$\frac{R_{10}}{R_{1000}} = \frac{10,00043}{1000,66} = 0,0099977 \approx 0,01000.$$

$$\frac{R_1}{R_{1000}} = \frac{1,00013}{1000,66} = 0,00099947 \approx 0,00100.$$

$$\frac{R_{0,1}}{R_{1000}} = \frac{0,099994}{1000,66} = 0,00009993 \approx 0,00010.$$

Сравнивая отношения показаний потенциометра с соответствующими отношениями образцовых сопротивлений, получаем погрешности отношений сопротивлений потенциометра. Все вычисления сведены в нижеследующей таблице:

Отношения сопротивлений образцовых катушек	$\frac{R_{1000}}{R_{1000}}$	$\frac{R_{100}}{R_{1000}}$	$\frac{R_{10}}{R_{1000}}$	$\frac{R_1}{R_{1000}}$	$\frac{R_{0,1}}{R_{1000}}$
	1	0,99994	0,010000	0,00100	0,00010
	$U_1/U_1$	$U_2/U_1$	$U_3/U_1$	$U_4/U_1$	$U_5/U_1$
$U_2 = 1,5$	1,00000	0,99994	0,01000	0,00100	0,00010
$U_2 = 1,4$	1,00000	0,99994	0,01000	0,00100	0,00010
$U_2 = 1,3$	1,00000	0,99994	0,01000	0,00100	0,00010
$U_2 = 1,2$	1,00000	0,99996	0,01000	0,00100	0,00011
$U_2 = 1,1$	1,00000	0,99995	0,01000	0,00100	0,00011
$U_2 = 1,0$	1,00000	0,99994	0,01000	0,00100	0,00011
$U_2 = 0,9$	1,00000	0,99993	0,01000	0,00100	0,00010
$U_2 = 0,8$	1,00000	0,99994	0,01000	0,00100	0,00011
$U_2 = 0,7$	1,00000	0,99994	0,00999	0,00100	0,00014
$U_2 = 0,6$	1,00000	0,99993	0,00998	0,00100	0,00016
$U_2 = 0,5$	1,00000	0,99995	0,01000	0,00100	0,00012

Здесь  $U_1, U_2, U_3, U_4$  и  $U_5$  — показания потенциометра. Точность данной таблицы — до четвертого десятичного знака, пятый знак ориентировочный. Разность между отношением сопротивлений образцовых катушек и отношением соответствующих показаний потенциометра дает нам поправку. Как видно из данной таблицы она не превышает единицы последнего знака, так что при пользовании потенциометром поправка можно не вводить.

#### ПОВЕРКА ПОТЕНЦИОМЕТРА ПУТЕМ СРАВНЕНИЯ ЕГО ПОКАЗАНИЙ С ПОКАЗАНИЯМИ ОБРАЗЦОВОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА

При сравнении показаний двух потенциометров пользуются одним нормальным элементом, который через переключатель присоединяется попеременно к образцовому и испытываемому потенциометру; также и гальванометр в том случае, если сопротивления потенциометров одного и того же порядка; если же сопротивления потенциометров различны, например сопротивления одного — порядка сотен омов, а другого — порядка тысяч и десятков тысяч омов, то для каждого потенциометра приходится употреблять отдельный, ему соответствующий гальванометр и, кроме того, чтобы чувствительность измерения для обоих потенциометров была одного и того же порядка.

Проверка производится следующим образом: при помощи нормального элемента в обоих потенциометрах устанавливаются токи в основных потенциометрических цепях, и падение напряжения в отдельных сопротивлениях испытываемого потенциометра, получающееся при прохождении по ним установленного тока, измеряется образцовым потенциометром. Для этого зажимы испытываемого потенциометра присоединяются к зажимам  $X$  образцового потенциометра.

- $A_1$  — образцовый потенциометр,
- $A_2$  — испытываемый потенциометр,
- $G$  — гальванометр,
- $E_N$  — нормальный элемент,
- $K_1$  и  $K_2$  — переключатели,
- $B_1$  и  $B_2$  — аккумуляторы,
- $R_1$  и  $R_2$  — регулировочные реостаты.

Переключатели  $K_1$  и  $K_2$  замыкаются в положения II, а переключатель  $M_2$  потенциометра  $A_2$  — в положение  $N$ ; при помощи реостата  $R_2$  устанавливается основной ток в потенциометре  $A_2$ . Затем переключатели  $K_1$  и  $K_2$  замыкаются в положение I, переключатель  $M_1$  — в положение  $N$  и реостатом  $R$  устанавливается основной ток в потенциометре  $A_1$ . Переведя переключатели  $M_1$  и

потенциометров в положение  $X$  и замкнув зажимы  $\Pi$  переключателя  $K_1$  накоротко, измеряют образцовым потенциометром разность потенциалов на зажимах  $X$  испытуемого потенциометра при введении в цепь различных его сопротивлений. Этот метод очень простой и не требует большого времени, следует только следить за постоянством токов в потенциометрах. Он применим для проверки тех декад потенциометра, для которых разность потенциалов на зажимах  $X$  получается достаточно большой при основном токе в потенциометре и может быть измерена образцовым потенциометром с достаточной точностью. В про-

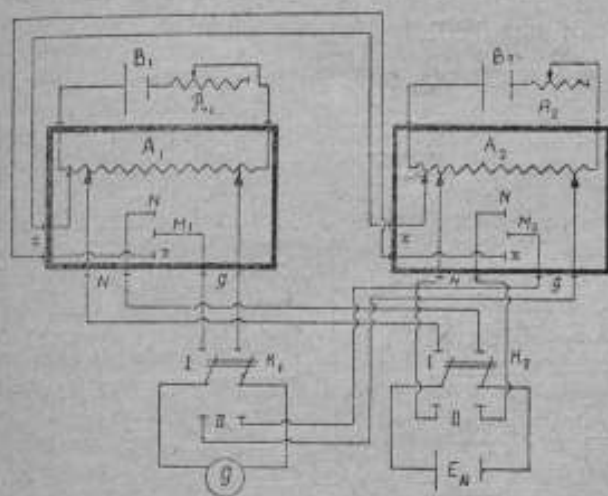


Рис. 9. Схема проверки потенциометра методом сравнения с образцовым.

тивных случаях пригоден другой метод, а именно: составляется последовательная цепь, состоящая из источника тока, регулирующего реостата, амперметра и двух образцовых катушек сопротивления, причем сопротивление одной из них в 10, 100 или 1000 раз больше сопротивления другой. При помощи регулирующего реостата в этой цепи устанавливают такую силу тока, чтобы разность потенциалов на зажимах образцовой катушки меньшего сопротивления уравновешивалась разностью потенциалов на зажимах  $X$  испытуемого потенциометра, разность же потенциалов на зажимах образцовой катушки большего сопротивления измеряется образцовым потенциометром.

Тогда имеем:

$$U_1 = IR'_N; U_2 = IR''_N; \frac{U_1}{U_2} = \frac{IR'_N}{IR''_N} = \frac{R'_N}{R''_N}, \text{ или: } U_1 = U_2 \frac{R'_N}{R''_N}$$

Здесь  $U_1$  — показание испытуемого потенциометра,  
 $U_2$  — " " образцового " "  
 $I$  — ток в образцовых катушках сопротивления,  
 $R'_N$  — сопротивление образцовой катушки меньшего со-  
 тивления,  
 $R''_N$  — сопротивление образцовой катушки большего со-  
 тивления.

Погрешность отношения образцовых сопротивлений об-  
 настолько мала, что ею можно пренебречь и считать, что  
 равно 0,1, 0,01 или 0,001.

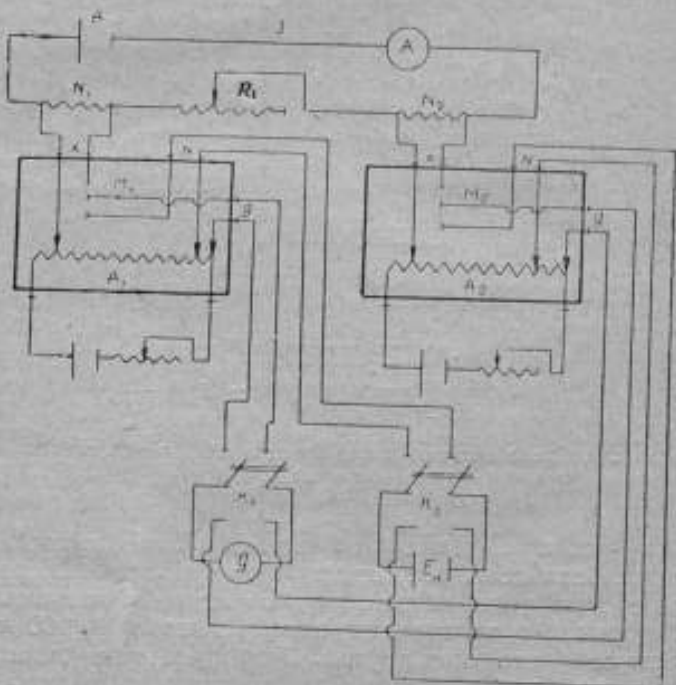


Рис. 10. Вторая схема проверки потенциометра методом сравнения с образцовым.

Разность  $U_2 \frac{R'_N}{R''_N} - U_1 = \pm \alpha$  представляет собою поправку  
 казания потенциометра.

$A$  — амперметр,  
 $B$  — аккумуляторная батарея,

$R_x$  — регулировочный реостат,  
 $N_1$  и  $N_2$  — образцовые катушки сопротивления,  
 $A_1$  — испытуемый потенциометр,  
 $A_2$  — образцовый потенциометр,  
 $G$  — гальванометр,  
 $E_N$  — нормальный элемент.

В качестве примера здесь приводится поверка потенциометра системы Рапс, изготовленного мастерскими ВИМСа.

ПОВЕРКА ПОТЕНЦИОМЕТРА СИСТЕМЫ РАПС, ИЗГОТОВЛЕННОГО МАСТЕРСКИМИ ВИМСА, ПУТЕМ СРАВНЕНИЯ С ОБРАЗЦОВЫМ ПОТЕНЦИОМЕТРОМ ФИРМЫ LEEDS & NORTHRUP

Поверка декад „ $\times 1000$ ” и „ $\times 100$ ” производится по схеме чертежа 9, остальные декады поверяются по схеме чертежа 10, а, ввиду того, что потенциометр системы Рапс принадлежит типу потенциометров большого сопротивления, а потенциометр типа „К” — к потенциометрам малого сопротивления, то для каждого потенциометра употребляется отдельный, ему соответствующий гальванометр.

ТАБЛИЦА НАБЛЮДЕНИЙ

Декада „ $\times 1000$ ”

Показания потенциометра	Значения показаний в вольтах	Показания образцового потенциометра в вольтах		Действит. знач. показ. потенци. в вольтах	Поправки в вольтах
1	0,1	0,09998	0,10000	0,09999	-0,00001
2	0,2	0,20002	0,20000	0,20001	+0,00001
3	0,3	0,30003	0,30001	0,30002	+0,00002
4	0,4	0,40005	0,40003	0,40004	+0,00004
5	0,5	0,50002	0,50003	0,50002	+0,00002
6	0,6	0,60000	0,60003	0,60002	+0,00002
7	0,7	0,70000	0,70003	0,70002	+0,00002
8	0,8	0,80002	0,80003	0,80003	+0,00003
9	0,9	0,90005	0,90003	0,90004	+0,00004
10	1,0	1,00005	1,00003	1,00004	+0,00004

Декада „ $\times 100$ “

Показания потенциометра	Условные значения показ. в вольтах	Показания образцового потенциометра		Среднее	Действит. знач. показ. потенциом. в вольтах	Поправка в вольтах
1	0,01	0,00995	0,00999	0,00997	0,00997	-0,00002
2	0,02	0,01999	0,01997	0,01998	0,01998	-0,00002
3	0,03	0,02996	0,03000	0,02998	0,02998	-0,00002
4	0,04	0,03997	0,03997	0,03997	0,03997	-0,00000
5	0,05	0,04994	0,04994	0,04994	0,04994	-0,00000
6	0,06	0,05999	0,05998	0,05999	0,05999	-0,00001
7	0,07	0,06999	0,06993	0,06999	0,06999	-0,00006
8	0,08	0,07999	0,07998	0,07999	0,07999	-0,00001
9	0,09	0,08999	0,08999	0,08999	0,08999	-0,00000

При проверке декад „ $\times 10^4$ “, „ $\times 1^4$ “ и „ $\times 0,1^4$ “ разность потенциалов на зажимах образцовой катушки в 0,1 ома уравновешивается разностью потенциалов на зажимах „X“ потенциометра, а разность потенциалов на зажимах катушки в 10 ома измеряется образцовым потенциометром.

Декада „ $\times 10^4$ “

Показания потенциометра	Условные значения показ. в вольтах	Показания образцового потенциометра		Среднее	Действит. знач. показ. потенциом. в вольтах	Поправка в вольтах
1	0,001	0,10000	0,10000	0,10000	0,001000	0
2	0,002	0,20010	0,20002	0,20006	0,002001	+0,00006
3	0,003	0,29952	0,29948	0,29950	0,002995	-0,00002
4	0,004	0,39938	0,39945	0,39942	0,003994	-0,00002
5	0,005	0,49924	0,49945	0,49935	0,004994	-0,00002
6	0,006	0,59925	0,59914	0,59920	0,005992	-0,00002
7	0,007	0,69889	0,69915	0,69902	0,006990	-0,00002
8	0,008	0,79895	0,79915	0,79905	0,007991	-0,00002
9	0,009	0,89891	0,89885	0,89888	0,008989	-0,00002



## Декада „×1“

Показание потенциометра	Условные значения показ. в вольт.	Показания образцового потенциометра		Средние	Действит. знач. показ. потенциом. в вольт.	Поправки в вольтах
1	0,0001	0,01026	0,01014	0,01020	0,000102	+0,000002
2	0,0002	0,02014	0,02002	0,02008	0,000201	+0,000001
3	0,0003	0,03017	0,03010	0,03014	0,000301	+0,000001
4	0,0004	0,04020	0,04002	0,0411	0,000401	+0,000001
5	0,0005	0,05003	0,05015	0,05009	0,000501	+0,000001
6	0,0006	0,05981	0,05987	0,05984	0,000598	-0,000002
7	0,0007	0,06998	0,06998	0,06998	0,000700	0
8	0,0008	0,07995	0,08018	0,08007	0,000801	+0,000001
9	0,0009	0,09000	0,09000	0,09000	0,000900	0

## Декада „0,1“

Показание потенциометра	Условные значения показ. в вольт.	Показания образцового потенциометра		Средние	Действит. знач. показ. потенциом. в вольтах.	Поправки в вольтах
1	0,00001	0,00132	0,00118	0,00125	0,000012	+0,000002
2	0,00002	0,00217	0,00224	0,00221	0,000022	+0,000002
3	0,00003	0,00318	0,00309	0,00314	0,000031	+0,000001
4	0,00004	0,00413	0,00415	0,00414	0,000041	+0,000001
5	0,00005	0,00517	0,00520	0,00519	0,000052	+0,000002
6	0,00006	0,00627	0,00631	0,00629	0,000063	+0,000003
7	0,00007	0,00714	0,00734	0,00724	0,000072	+0,000002
8	0,00008	0,00816	0,00823	0,00820	0,000082	+0,000002
9	0,00009	0,00910	0,01019	0,00919	0,000092	+0,000002
10	0,00010	0,01025	0,01018	0,01022	0,000102	+0,000002

Ленинград, ВИС, Лаборатория постоянного тока

MÉTHODES EMPLOYÉES POUR L'ESSAI DES POTENTIOMÈTRES AU LABORATOIRE DU COURANT CONTINU DE L'IMS

par A. A. Pavlova

(Résumé)

Cet article contient la description des méthodes employées pour l'essai et la vérification des différents types de potentiomètres; des méthodes servant à la vérification des rapports des résistances des potentiomètres et la méthode à suivre pour la comparaison des indications du potentiomètre essayé avec les indications du potentiomètre-étalon.

## ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ В ДИАПАЗОНЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН

Г. А. Кьяндский

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время принято называть длинными волны более 200 м, короткими — от 10 до 200 м, ультракороткими — от 1 до 10 м. Это деление уточнено Международным консультативным комитетом по радиоэлектричеству (С. С. I. R., вторая сессия, 1931 г.), а именно: длинными волнами следует называть волны свыше 3000 м, средними — от 200 до 3000 м, промежуточными — от 50 до 200 м, короткими — от 10 до 50 м и очень короткими — от 1 до 10 м. В областях частот свыше 300 мегагерц принято называть дециметровыми волны от 0,1 до 1 м и сантиметровыми — от 0,01 до 0,1 м. Приведенное подразделение учитывает главные свойства электромагнитных колебаний данного диапазона, как-то: условия распространения волн между передающей и приемной радиостанциями, методы генерирования и радиоприема. Указанные здесь границы волн являются ориентировочными: способы получения или обнаружения волн или методы измерения их, показавшие целесообразность применения их в одном диапазоне, оказываются часто полезными в смежном диапазоне.

Настоящая работа относится к диапазону очень коротких волн или, по общепринятой терминологии, — ультракоротких волн.

Задачами работы являются: оборудование генераторной и измерительной установок, позволяющих осуществить поверку волномеров для ультракоротких волн (в дальнейшем будем называть сокращенно УКВ), а также разработка метода, позволяющего установить связь с эталонами частоты в областях коротких и длинных волн.

В соответствии с поставленными задачами осуществленная установка состоит из следующих частей: генераторные установки, приемник и измерительные устройства.

### 2. ГЕНЕРАТОРЫ УКВ

Генераторы УКВ в принципе не отличаются от обычных схем ламповых генераторов, обладая, однако, рядом особенностей, как-то: небольшими величинами емкости и индуктивности коле-

бательного контура, участием в колебательном процессе индуктивной емкости лампы, необходимостью дросселирования цепи анода, наличием стоячих волн напряжения и тока в случае генерирования очень высоких частот, и т. д. Следует отметить также, что диапазон УКВ по частоте соответствует диапазону от 30 до 300 мегагерцев, и генерирование такой широкой полосы частот при помощи какой-либо одной схемы неосуществимо; приходится прибегать к нескольким различным по схеме установкам.

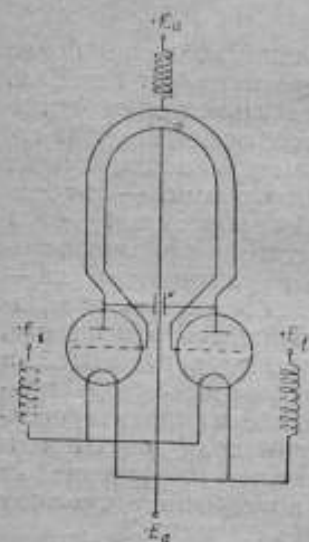


Рис. 1. Схема лампового генератора на волны от 7,5 до 16 м.

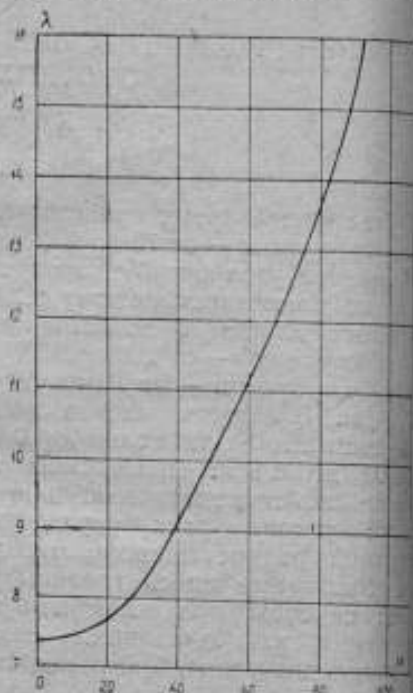


Рис. 2. Кривая градуировки к рис. 1.

В настоящей работе были применены две схемы. Первая из них приведена на рис. 1 и представляет собою двухтактную схему, являющуюся вариантом схемы Гюттон-Пьерре. Заметьте, что перекрещивание концов катушки сетки позволяет переключить к схеме Мени с нормальной индуктивной связью.

Работа велась как по той, так и по другой схеме на лампах типа УК-30, замененных далее лампами ГК-36. Питание цепи накала — от аккумулятора, анода — от выпрямителя.

Применение конденсатора переменной емкости позволило получить непрерывную шкалу волн в пределах от 7,5 до 16 м. На рис. 2 приведена градуировочная кривая этого генератора.

Рис. 3 представляет собою фотографию генератора. Катушка самондукции по одному витку — из посеребренной меди

В трубке: анодная катушка — больших размеров — закреплена горизонтально, сеточная — может поворачиваться вокруг своего осе-  
 лования. Ввиду того, что это перемещение катушки производится  
 трением, — катушка сетки может быть установлена относи-  
 тельно анодной под любым углом в пределах от  $0^\circ$  до  $120^\circ$  и  
 при этом сохраняет устойчивое положение, что (вместе с жест-  
 костью монтажа) гарантирует удовлетворительную устойчивость  
 частоты.

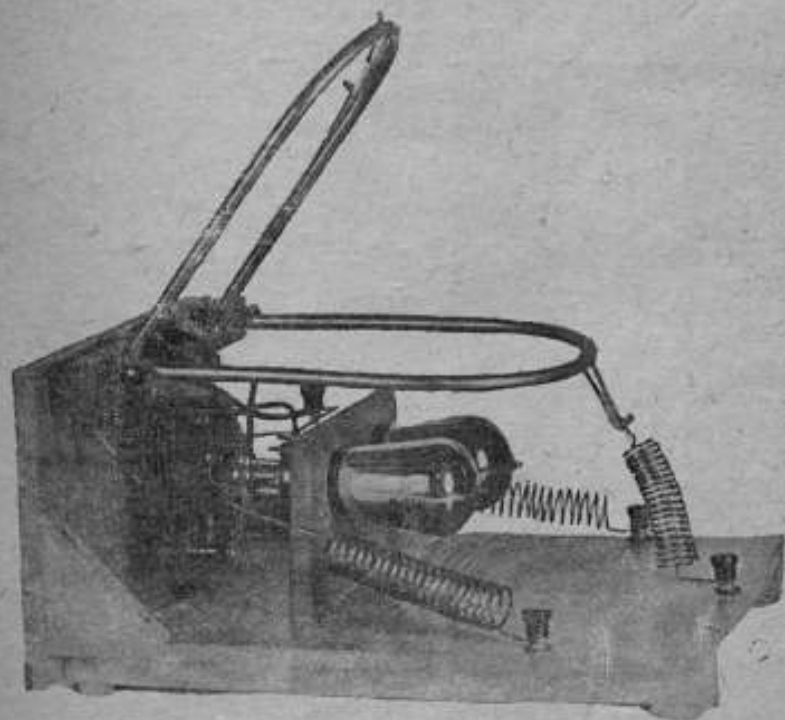


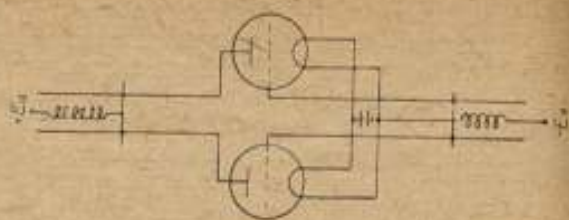
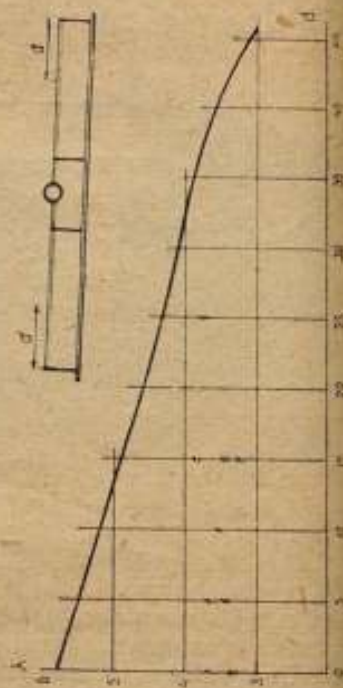
Рис. 3. Ламповый генератор диапазона волн от 7,5 до 16 м.

Для генерирования в области волн короче 7 м была приме-  
 нена схема Хольборна (рис. 4) — также двухтактная на лампах  
 УК-30, отличающаяся еще меньшим количеством деталей, чем  
 предыдущая: конденсаторы отсутствуют, катушки самоиндукции —  
 в виде двух мостиков в анодной и сеточной цепи. На фотогра-  
 фии (рис. 5) видны горизонтальные параллельные трубчатые  
 проводники, по которым перемещаются мостики — поперечные  
 трубки, что позволяет изменять длину генерируемой волны.

При градуировке схемы Хольборна мостики анодной и сеточ-  
 ной катушек устанавливались на одинаковом расстоянии ( $d$ ) от



Рис. 5. Ламповый генератор диапозона воли от 3,0 до 5,8 м.



концов анодной и сеточной катушек. Проградуированный в этих условиях генератор Хольборна дал шкалу волн от 3 до 5,8 м (график градуировки приведен на рис. 6).

### 3. ВОЛНОМЕР УКВ

Для предварительного определения длины волны генерируемых колебаний с точностью 1—2% лабораторией изготовлен резонансный волномер, состоящий из конденсатора переменной емкости

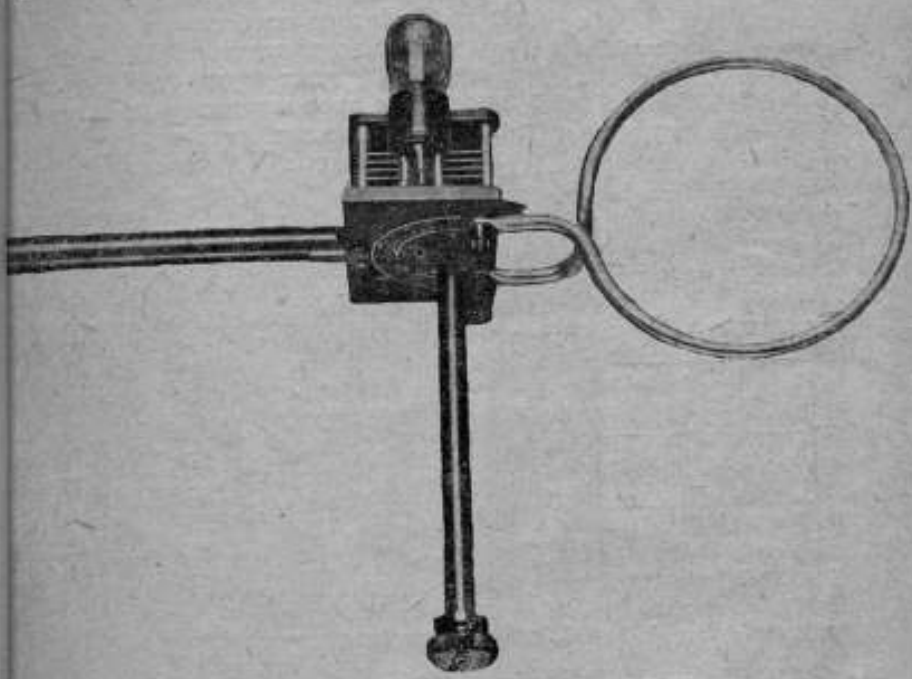


Рис. 7. Волномер для ультракоротких волн.

сти с максимальной емкостью 75 микромикрофард и трех катушек самоиндукции: две по одному витку диаметром 7,8 и 16 см и третья — в два витка, диаметром 16 см. Индуктивности катушек соответственно равны 0,17; 0,25 и 1,1 микрогенри. В качестве индикатора резонанса применена нить накала усилительной лампы Микро. Анод и сетка лампы оставлены свободными. Для наблюдения за степенью накаливания нити баллон лампы был освобожден нагреванием от покрывающего его изнутри магниевого слоя. Для устранения влияния наблюдателя на градуировку волномер снабжен удлинительными эбонитовыми рукоятками. Это дало возможность обойтись без экранирования контура волномера, вносящего дополнительные потери энергии. Внешний вид волно-

мера с катушкой в один виток диаметром 16 см из посеребренной медной трубки показан на рис. 7.

Градуировочные кривые волномера для трех его катушек приведены на рис. 8, 9 и 10. Градуировка волномера выполнена при помощи системы Лехера.

#### 4. СИСТЕМА ЛЕХЕРА

Разработанный лабораторией токов высокой частоты и структурским бюро ВИМС проект разборной системы параллельных труб Лехера не был принят к производству мастерскими ВИМС ввиду его конструктивных трудностей. Поэтому в помещении лаборатории была натянута упрощенная система двух параллельных проводов Лехера (диаметр про-

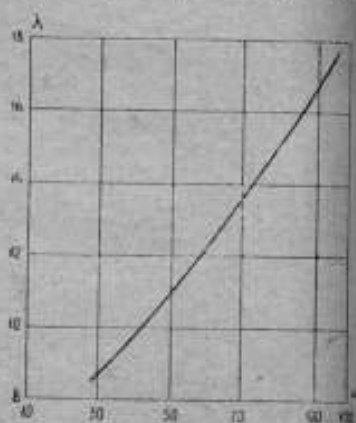
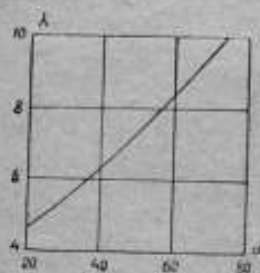
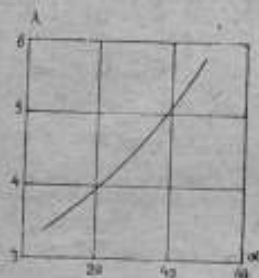


Рис. 8, 9 и 10. Кривые градуировки волномера.

дов 2,5 мм, расстояние между проводами 50 мм, длина проводов 7 м). Сопротивление мостика системы взято меньшим ее нового сопротивления: в мостике в качестве индикатора применена лампочка карманного фонаря или нить накала лампы Микс.

Расчет поправок А. Хунда (A. Hund, „Scientific Papers of the Bureau of Standards“, No. 491, 1924) показал, что при достигнутой точности измерения (порядка 0,5—1,0%) введения поправок не требуется.

#### 5. ПРИЕМНИК УКВ

Ввиду того, что на ряду с методами резонансного волномера и системы Лехера намечено было выяснение возможности применения метода биений в диапазоне УКВ, — средствами лаборатории был собран ламповый приемник.



Преимущества суперрегенеративного принципа радиоприема в области УКВ—острая настройка, достаточная устойчивость частоты, большое усиление, благодаря работе вблизи критической точки генерации—заставили остановиться на приемнике этого типа, причем была использована схема, рекомендованная коротковолновым отделом ЦРЛ ОДР СССР („Радиофронт“ № 9, 1932). Приемник собран по двухтактной схеме (рис. 11) на лампах УБ-107; генерирование вспомогательной пониженной частоты производится теми же лампами. При испытании приемника выяснилась целесообразность добавления одной ступени усиления низкой частоты (трансформаторный каскад).

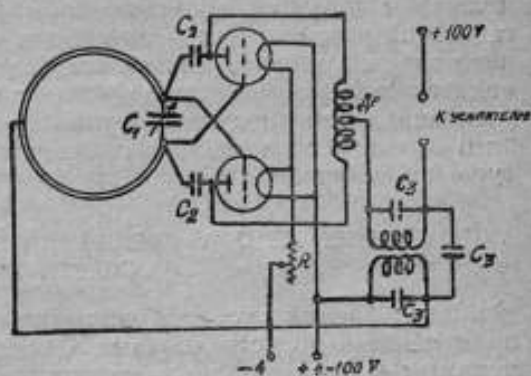


Рис. 11. Схема радиоприемника для ультракоротких волн.

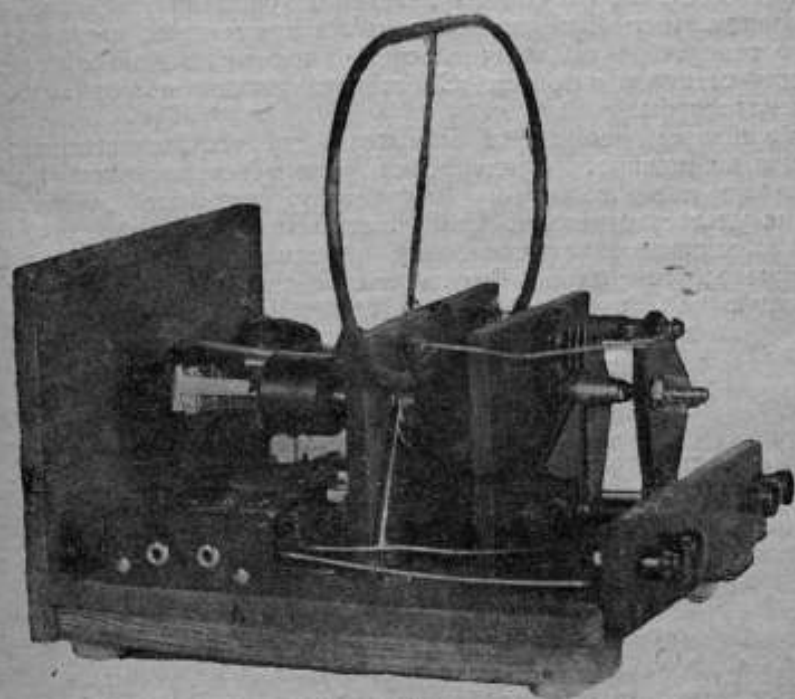


Рис. 12. Радиоприемник для ультракоротких волн.

Внешний вид приемника приведен на рис. 12: в верхней части видна катушка самоиндукции в один виток, под лампами расположены катушки и конденсаторы для генерирования постоянной частоты; приемник собран на угловой панели; вращение подвижных пластин конденсатора переменной емкости производится при помощи удлинительной рукоятки. Значительное усиление приема получается при применении "антенны" — медного прута, располагаемого горизонтально вблизи катушки катушка приемника.

#### 6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БИЕНИЙ К ИЗМЕРЕНИЮ ДЛИНЫ ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ УКВ

Метод биений двух незатухающих колебаний, нашедший свое применение в области длинных и коротких волн, оказался применимым и в диапазоне ультракоротких волн.

Разработанные в 1931 г. пьезоэлектрические генераторы с турмалиновыми пластинками (H. Straubel, „Physik. Zeitschr. B. 32) в настоящее время считаются генераторами эталонной частоты в области УКВ. Намеченная для данной работы сборка нескольких схем турмалиновых генераторов не была осуществлена, вследствие отсутствия пластинок турмалина.

Ввиду этого была сделана попытка применения пьезокварцевого генератора по обычной схеме, при включении пластинки между сеткой и катодом. Собственная волна пьезокварцевого генератора была 69,26 м.

Основным решающим моментом явилась выяснившаяся в опыте возможность градуировки суперрегенеративного приемника по пьезокварцевому генератору: на фоне „суперного шума“ удалось отчетливо прослушать в телефоне приемника биения высокочастотных колебаний приемника и колебаний пьезокварцевого генератора. Результаты наблюдений сведены в следующую таблицу.

Показания конденсатора суперрегенератора	Порядок выделенных гармоник пьезокварца	Длины волн (в метрах) суперрегенератора
18,0	12	5,77
37,0	11	6,29
54,5	10	6,93
69,0	9	7,69
83,5	8	8,66
97,0	7	9,89

Последний столбец таблицы найден делением собственной волны пьезокварца на порядок выделенной гармоники. По дан

ным градуировки построена кривая длин волн приемника (рис. 13), имеющая нормальный вид для логарифмического (средне-линейного) конденсатора приемника.

Проградуированный по гармоникам пьезокварца суперрегенератор может быть применен к измерению длины волны генератора УКВ. Для этого приемник располагается в нескольких метрах от генератора. В телефоне приемника наблюдаются биения между основным колебанием генератора и основным колебанием приемника. Найденный при этом отсчет по конденсатору приемника позволяет по данным его градуировки определить измеренную волну. Для получения более точных результатов необходимо по данным градуировки суперрегенератора вывести формулу зависимости  $\lambda = \varphi(\alpha)$  для каждого участка между двумя соседними опорными точками (гармоники пьезокварца). Тогда измеренная волна генератора определится вычислением по интерполяционной формуле.

В целях устранения влияния последующих за градуировкой суперрегенератора изменений его параметров рекомендуется вслед за измерением волны генератора проверить положение опорных точек по пьезокварцу и при вычислении длины волны по выведенной ранее интерполяционной формуле внести в отсчет соответствующего значения поправку.

Градуировка суперрегенератора может быть выполнена по частоте (в мегагерцах), тогда из измерения будет определяться частота колебательного тока генератора. Конечно, при изложенном методе могут быть использованы на ряду с основными колебаниями и гармоники генератора.

Следует отметить, что применение при УКВ обычного в технике длинных волн метода биений двух незатухающих колебаний затруднено недостаточной стабильностью биений. При суперрегенерации же биения вполне устойчивы.

Величина относительной погрешности измерения по предлагаемому методу может быть оценена в 0,5—1,0%.

Изложенный метод суперрегенеративного приема для измерения длин УКВ по биениям предложен автором статьи в начале 1933 г., приведенная выше таблица градуировки и график (рис. 13) получены опытным путем 14 марта 1933 г. В дальнейшем выяснилось, что аналогичная работа в том же году, но несколько позже, выполнена в Японии: в статье Н. Ataka, „Superregenerative

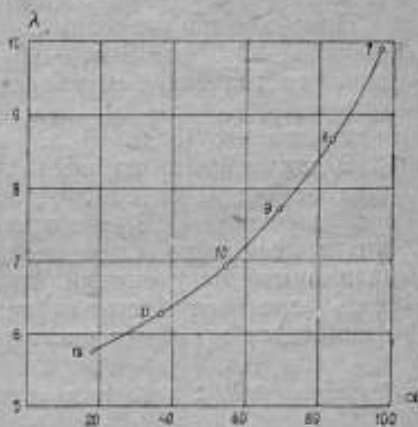


Рис. 13. Кривая градуировки суперрегенеративного приемника, полученная методом биений.

wave-meter for ultra short waves", помещенной в ноябрьском номере журнала "Proc. of the Inst. of Radio Eng." (vol. 21, No. 11, November 1933, p. 1590), также используется суперрегенератор для той же цели и с такими же результатами (погрешность 1% и менее). Измерения ведутся не по методу биений, а по методу поглощения.

Это обстоятельство подчеркивает правильность предлагаемого разрешения вопроса измерения УКВ методом биений при современном состоянии техники УКВ.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи описанных выше генераторов УКВ перекрывает диапазон от 3 до 16 м. Что касается методов измерения длин волн, то резонансным волномером измеряется тот же диапазон системой Лехера — до 12 м и новый метод (биений) опробован в диапазоне от 6 до 10 м.

В дальнейшем намечено построить: генератор на диапазоне волн от 3 до 1 м, суперрегенеративный приемник (волномер) на весь диапазон УКВ, резонансный волномер повышенной точности и несколько схем генераторов эталонной частоты с кварцевыми или малиновыми пластинками. Кроме того, предполагается установить связь через посредство волномерных установок коротких волн с основным эталоном частоты лаборатории.

*Ленинград, ВИМС, Лаборатория токов высокой частоты*

LA MESURE DE LA LONGUEUR D'ONDE DANS LE DIAPASON  
DES ONDES ULTRA-COURTES

Par G. A. Kiandsky

(Résumé)

Cet article contient la description des installations de mesure des ondes ultra-courtes au laboratoire des courants à haute fréquence de l'Institut de Métrologie de l'URSS, à savoir: deux générateurs à lampes, un ondemètre, un système Lecher et un radiorécepteur. L'auteur propose une nouvelle méthode de mesure des longueurs ultra-courtes — la méthode des battements formés par les oscillations de haute fréquence, et celles d'un radiorécepteur superrégénératif.

---

## ОБРАЗЦОВЫЕ КАТУШКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

А. И. Маренна

Лаборатория электрических образцовых мер ВИМСа разработала тип образцовой катушки сопротивления в 0,1—1—10—100—1000—10000 омов и изготавливает их как вторичные эталоны для научно-исследовательских лабораторий.

Эталонные катушки сопротивления должны обладать следующими свойствами:

- 1) постоянством,
- 2) малым температурным коэффициентом,
- 3) хорошей и постоянной изоляцией,
- 4) такой конструкцией, которая позволяла бы легко измерять сопротивление,
- 5) сопротивление должно быть безиндукционным,
- 6) беземкостным,
- 7) термоэлектрические эффекты должны отсутствовать.

Из этих качества 1, 2 и 7 почти целиком зависят от материала, из которого сделаны катушки.

Материалом, употребляемым для этой цели, является исключительно манганин, как лучше всего удовлетворяющий перечисленным требованиям.

Наиболее важное условие для эталонных катушек — постоянство.

Манганин обладает свойством с течением времени уменьшать свое сопротивление, как говорят „стариться“. Так как это уменьшение совершенно недопустимо в эталонах, применяют искусственное старение, т. е. предварительно доводят материал к такого состояния, что его сопротивление уже перестает меняться от времени, делается стабильным.

Для изготовления катушек нами был взят манганин, полученный из Германии от торгпредства, неизвестных фирм и фирмы Vogel.

При исследовании его оказалось, что способы старения, употребляемые в Германии и рекомендуемые Reichsanstalt'ом, не годятся для данных материалов, так как далеко не дают полной окончательной стабильности. Например, Reichsanstalt предлагает следующий способ старения: продержать манганин в воздушной ванне, нагретой до 140°, в продолжение 6 часов. После охлаждения постоянство сопротивления считается достигнутым.

Применяя данный способ к полученному из Германии манганину, мы выяснили, что после такого старения манганин еще уменьшает свое сопротивление примерно на столько же, сколько он уменьшил за время такого старения, т. е. стабильности не получается.<sup>1</sup> Поэтому по выяснении таких качеств манганина пришлось разработать другие способы его старения.

Были сделаны пробы различных способов: старили током, старили нагревом в масляной ванне, в воздушной. Наилучшие результаты, в смысле времени старения и получения потом постоянства, дал следующий способ. Латунный стаканчик обматы-

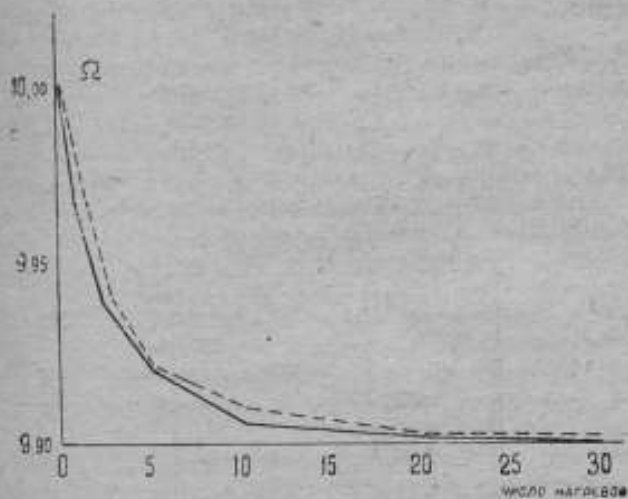


Рис. 1.

вается шелковой изоляцией и покрывается раствором шеллака. (Чистый шеллак растворяется в безводном спирте, подогревается и фильтруется несколько раз. Сохраняется в хорошо закрытом сосуде в сухом месте). После просушки подогревом стакана с изоляцией, наматывается манганиновая проволока с двойной шелковой изоляцией.

Для соблюдения пункта 5 проволока наматывается бифилярно, концы закрепляются шелком, все покрывается шеллаком и подвешивается в воздушную ванну, в которой поддерживается температура 120 — 130° С.

Практика показала, что манганин достаточно подвергать такой температуре полчаса, затем вынуть и дать естественно охладиться примерно тоже в полчаса, после чего вновь нагреть, опять охладить.

<sup>1</sup> Хорошие результаты способа Reichsanstalt в Берлине объясняются тем, что там получают манганин от лучшей фирмы Isabellen Hütte, приготовленный специально для сопротивлений и почти состаренный в процессе выработки.

дуть и т. д. Некоторые сорта мanganина достаточно подвержены такому нагреванию и охлаждению раз 12, а другие больше. Мanganин, получаемый нами в последние годы от фирмы Voss, требуется подвергать нагреванию и охлаждению около 30 раз и только после этого можно считать его состаренным.

Кривые старения изображены на рис. 1. Из кривых видно, что наибольшее падение сопротивления приходится на первое старение: 0,25—0,35%. Во время остальных старений сопротивление снижается еще на 0,25—0,15%. Общее уменьшение сопротивления

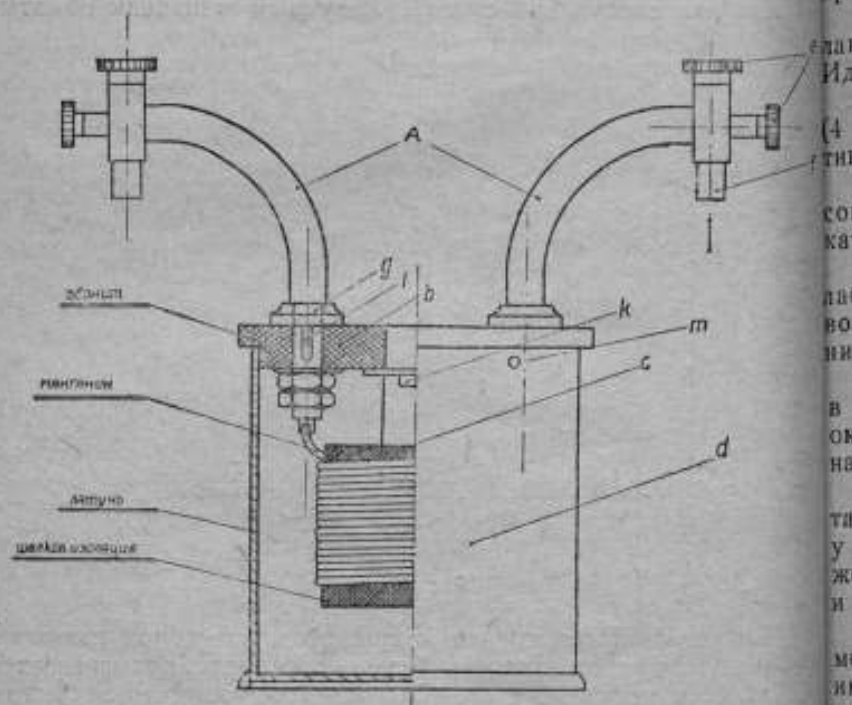


Рис. 2.

сопротивления достигает 0,4—0,5% первоначального. Постоянство считается достигнутым, когда шестой знак перестает меняться при постоянной температуре, например, при 1 оме сопротивление будет устойчиво до 1,00001 ома при одной и той же температуре (точность сопротивления 0,01%).

Сама конструкция образцовых катушек сопротивления изображена на рис. 2. Латунный стакан *c* из трубы без дна обернут шелком и покрыт шеллаком. На него наложены бифиларно витки мanganиновой проволоки с двойной шелковой изоляцией. Концы проволоки припаяны к рогам *A*, имеющим зажимы *e* и *f*, потенциальные и токовые.



Термометр помещается посредине катушки. Все сопротивление помещается в стакане *d*, куда наливается масло.

Защита от атмосферных влияний хорошим высушенным маслом практически дает хорошие результаты. Изменение от влажности было изучено в 1907 г. Edward Rosa в Bureau of Standards; оказалось, что масло тоже с течением времени впитывает влагу, а шеллак забирает ее из масла. Для предохранения от этого явления производится плотная закупорка стакана с маслом или просто масло меняется не реже одного раза в год.

В настоящее время, кроме того, мы стремимся исключить шеллак из-за его гигроскопичности, заменив его чем-нибудь другим. Идут опыты с другими лаками.

Постоянство своих катушек изучалось P.T.R. в течение 21 года (4 катушки в 1 ом); оказалось, что наибольшее изменение сопротивления равняется +60 микроомам.

Наблюдения лабораторий ВИМСа за 3 года дали изменения сопротивления в катушках в 1 ом от 18 до 30 микроомов, причем катушки все время были в повседневной работе.

Две катушки были посланы для сравнения в метрологические лаборатории Франции, Германии, Англии, США и Японии. После возвращения оказалось, что сопротивление этих катушек изменилось на 1 микроом.

Летом 1930 г. две катушки в 1 ом возились для сравнения в Париж, и по возвращении изменение сопротивления в одной оказалось на 2 микроома, а в другой 1 микроом. Катушки были наполнены маслом и наглухо закрыты.

Рога служат для подвода тока как посредством проводов, так и через ртутные контакты. Потенциалы берутся тут же у подводящих зажимов, что дает возможность иметь одну и ту же величину сопротивления как у потенциальных зажимов, так и у концов рогов, т. е. применять их как концевую меру.

В настоящее время лаборатория электрических образцовых мер ведет работу совместно с Кольчугинским заводом по замене импортного марганца отечественным. Образцы, изготовленные заводом, изучаются лабораторией и в соответствии с результатами завод изменяет плавку. В настоящий момент исследуется плавка, дающая настолько хороший результат, что можно уже сказать, что марганец Кольчугинского завода может быть применен в технических магазинах и приборах. Можно с уверенностью сказать, что в самом недалеком будущем марганец отечественного производства будет настолько хорош, настолько удовлетворит все требования, предъявляемые к материалу для точных сопротивлений, что возможно будет обойтись совсем без импортного марганца.

Ленинград, ВИМС, Лаборатория электрических образцовых мер

## LES BOBINES DE RÉSISTANCE-ÉTALONS

Par A. I. Marénina

(Résumé)

L'article contient un exposé des résultats du calcul et de la construction des bobines de résistance-étalons obtenus au Laboratoire des appareils électriques de référence de l'Institut de Métrologie de l'URSS. L'auteur décrit la construction de l'enroulement des bobines ainsi que la méthode de la stabilisation de la manganine, sur les observations faites au cours de plusieurs années.

---

## ВЛИЯНИЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЭЛЕКТРОДВИЖУЩУЮ СИЛУ НОРМАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е. С. Чураева

Нормальный элемент Вестона является чрезвычайно чувствительным и быстро реагирующим на всякие изменения окружающих его условий прибором. Поэтому как при работе с ним, так и при его хранении необходимо соблюдение особых правил предосторожности, рекомендуемых эталонной электрической лабораторией ВИС. Эти правила помещены на оборотной стороне свидетельств, которыми снабжаются все элементы, выпускаемые ВИС. Однако нередко случаи нарушения не только правил, но и наиболее элементарных требований бережного и осторожного обращения с нормальными элементами. Так, нередко случаи замыкания элементов на-коротко. С целью выяснения последствий короткого замыкания в эталонной электрической лаборатории ВИС было испытано несколько элементов. Результаты этих опытов приведены ниже.

Для исследования были взяты 9 нормальных элементов, изготовленных старшим научным сотрудником эталонной электрической лаборатории В. В. Мюллер в разное время (главным образом в 1932 и 1933 г.), из числа которых 7 обычного (распространенного) типа, изготовленные согласно ОСТ/ВКС 7457, а 2 — больших размеров, с увеличенной катодной поверхностью, также удовлетворяющие требованиям этого стандарта. Испытание велось по схеме рис. 1.

Для определения величины электродвижущей силы нормального элемента до замыкания его на-коротко, переключатель  $K$ , ставился в I положение, и электродвижущая сила определялась обычным методом с помощью компенсационного прибора.<sup>1</sup> После определения электродвижущей силы переключатель  $K$ , переводился во II положение, вследствие чего полюса элемента оказывались замкнутыми на-коротко; по истечении некоторого промежутка времени, определяемого посредством секундомера, элемент переключался вновь на компенсационный прибор и вновь определялась его электродвижущая сила.

<sup>1</sup> Е. С. Чураева, Метод и оборудование для сравнения нормальных элементов, издание ВИС, № 100, 1932, стр. 17—28 и 95—104.

Первый опыт был произведен с нормальным элементом обычного типа № 1138, который, по сравнению его с эталоном электродвижущей силы, был замкнут на собственное сопротивление на 1 сек. По прошествии 1 сек. элемент был переключен на компенсационный прибор. Электродвижущая сила этого элемента, измеренная в момент короткого замыкания, составляла 1,01838<sub>5</sub> вольта, измеренная через минуту после короткого замыкания выражалась числом 1,01829<sub>5</sub> вольта, т. е. уменьшилась на 90 микровольт, что составляет 0,009%, первоначального значения. Измерения электродвижущей силы этого элемента в следующие моменты указывают на ее нарастание, и уже через час его электродвижущая сила лишь на 0,0015% не достигает первоначального значения, а через 5 час

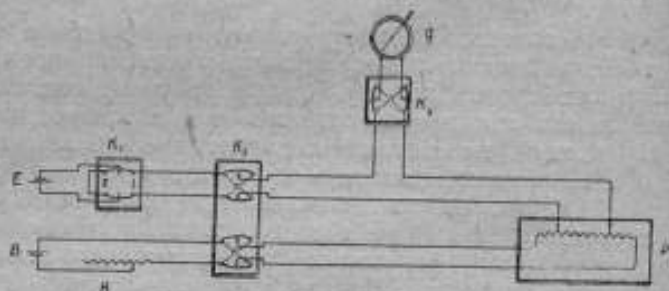


Рис. 1. Схема установки для сличения нормальных элементов.

- P* — потенциометр,
- K<sub>1</sub> K<sub>2</sub> K<sub>3</sub>* — ртутные переключатели
- R* — балластное сопротивление,
- G* — гальванометр,
- B* — батарея,
- E* — испытуемый элемент.

элемент дает начальную электродвижущую силу (разница — 0,0003%). Остальные элементы были разбиты на 2 группы, в каждую из которых вошло по 3 элемента обычного типа и по одному элементу с большой катодной поверхностью. Элементы №№ 508, 1235, 1242 и 1281 до испытаний еще не были в работе, остальные элементы — №№ 1322, 1448, 1333 и 1056 — до этого подвергались другим исследованиям. Одна из этих групп была подвергнута короткому замыканию сначала в течение 1 мин. (декабрь 1933 г.) и через три месяца — в течение 15 мин. (март 1934 г.), а другая группа — соответственно в течение 5 мин. (декабрь 1933 г.) и 30 мин. (март 1934 г.). Результаты этих опытов приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что после замыкания элементов в течение 1 мин. электродвижущая сила трех испытанных элементов упала в среднем на 0,02% от своего первоначального значения независимо от состояния взятых элементов и от их типа. По прошествии 10 мин. со времени размыкания элементов их электродвижущая сила восстановилась, за исключением элемента № 1235

Дальнейшие измерения электродвижущей силы обнаруживают возрастание последней даже выше значения элементов до короткого замыкания, так что через 1 час она превышала это значение в среднем на 0,0011%. Через пять суток электродвижущая сила элементов остается на том же уровне, а через 8 суток она приходит к начальному значению.

У нормальных элементов, замкнутых на коротко на 5 мин., электродвижущая сила, измеренная непосредственно по окончании короткого замыкания, упала в среднем на 0,063%, через 10 мин. для двух элементов она была еще ниже начальной в среднем на 0,012%, а для двух других — на 0,001%. Через час электродвижущая сила этих элементов, за исключением № 1242, восстановилась, а через сутки уже превышала начальную, оставаясь приблизительно на том же уровне и через 8 суток.

У нормальных элементов, подвергнутых короткому замыканию в течение 15 и 30 мин., наибольшее падение электродвижущей силы обнаруживает элемент № 1448, подвергавшийся замыканию на 30 мин.; восстановление электродвижущей силы особенно быстро происходит в течение первых 10—20 мин.; дальнейшее восстановление идет уже более медленным темпом, а через час разница между электродвижущей силой 5 элементов в рассматриваемый момент и до опыта не только выравнивается, но для некоторых элементов становится положительной (элементы с большой катодной поверхностью), и лишь восстановление элемента № 1448 запаздывает (—0,0036%). Увеличение электродвижущей силы не является случайным, так как последующие измерения показали, что оно наблюдается и у остальных элементов — как свежих, так и уже работавших. На рис. 2 представлены кривые, показывающие восстановление электродвижущей силы в течение первого часа после окончания короткого замыкания на 1, 5, 15 и 30 мин., а на рис. 3 — в последующие часы.

Е. F. Smith,<sup>1</sup> исследуя приготовленные им элементы, нашел, что после короткого замыкания в течение 1 мин. эти элементы восстанавливаются 0,0001 вольта уже через минуту и до 0,00001 вольта через 40 мин. после их размыкания; при коротком замыкании на 5 мин. восстановление электродвижущей силы достигает приблизительно 0,001 вольта через минуту после размыкания. Кроме того, Е. F. Smith'ом испытаны элементы на короткое замыкание в течение 5 часов и 5 дней. В первом случае для полного восстановления потребовалось 3 недели, а во втором — 6 недель.

Большое количество весьма разнообразных опытов над поляризацией и восстановлением электродвижущей силы нормальных элементов Вестона произведено S. J. Barnett'ом.<sup>2</sup> В опубликован-

<sup>1</sup>The Normal Weston Cadmium cell, collected Researches National Physical Laboratory. Vol. IV, 1908, pp. 108—110.

<sup>2</sup>Some experiments on the polarization and recovery of cadmium cells. The Physical Review, Vol. XVII, 1904, pp. 104—115.

ной им работе помещен ряд кривых восстановления электродвижущей силы нормальных элементов после короткого замыкания в течение 3, 4, 5, 10, 13 и 20 мин. Эти кривые аналогичны кривым, полученным для помещенных в настоящей работе нормальных элементов. По опытам S. J. Barnett'a, при замыкании элемент

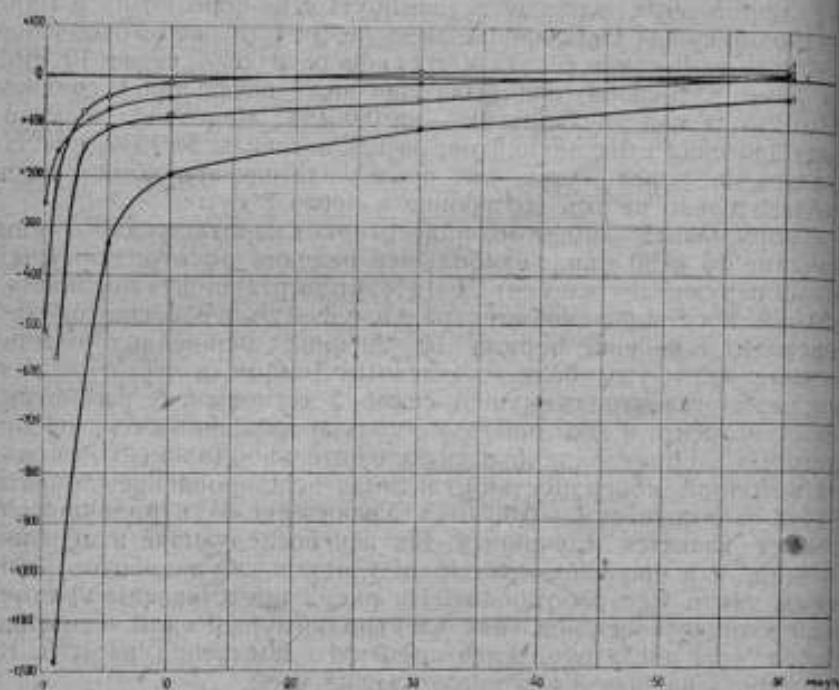


Рис. 2. Кривые восстановления электродвижущей силы нормальных элементов в течение 1 часа после короткого замыкания.

- |    |   |
|----|---|
| 1— | начальная электродвижущая сила элементов                  |
| 2— | элемент № 1235 после короткого замыкания в течение 1 мин. |
| 3— | • № 1281 • • • • • 5 •                                    |
| 4— | • № 1322 • • • • • 15 •                                   |
| 5— | • № 1448 • • • • • 30 •                                   |

на коротко в течение 3—5 мин. их электродвижущая сила через 10 мин. после размыкания восстанавливается приблизительно на 0,001%. При 10-мин. отдыхе после замыкания на 10—20 мин. электродвижущая сила не достигает первоначального своего значения на 0,01—0,02%.<sup>1</sup>

Помимо этих опытов S. J. Barnett исследовал элементы в разных комбинациях на короткое замыкание при последовательном

<sup>1</sup> Указанные процентные разницы электродвижущих сил взяты из помещенных в работе S. J. Barnett'a кривых.

соединении с аккумулятором и динамомашинной и на зарядку элементов от этих же источников. В первом из этих случаев восстановление элементов при разомкнутой цепи шло быстрее, чем во втором.

Однако в этих двух работах нет указаний на подмеченное нами явление временного возрастания электродвижущей силы выше ее значения до короткого замыкания.

Marion Erpley<sup>1</sup> производил опыт короткого замыкания ненасыщенных нормальных элементов (фирмы Erpley). Три элемента после короткого замыкания в течение 10 мин. восстановились к концу 7-го часа до 0,02% первоначальной величины, а элемент,

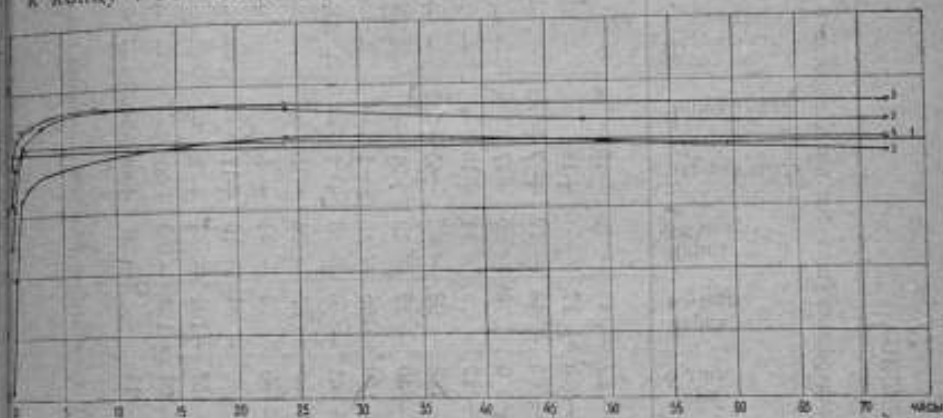


Рис. 3. Кривые восстановления электродвижущей силы нормальных элементов в течение 72 часов после короткого замыкания.

- |    |                                |                                     |        |    |   |
|----|--------------------------------|-------------------------------------|--------|----|---|
| 1— | начальная электродвижущая сила |                                     |        |    |   |
| 2— | элемент № 1235                 | после короткого замыкания в течение | 1 мин. |    |   |
| 3— | " № 1281                       | "                                   | "      | 5  | " |
| 4— | " № 1322                       | "                                   | "      | 15 | " |
| 5— | " № 1448                       | "                                   | "      | 30 | " |

замкнутый на 30 мин., восстановился через 11 часов до 0,07% и через 30 дней до 0,007% первоначального значения.

Как видно, элементы с ненасыщенным электролитом восстанавливаются медленнее элементов насыщенных.

Опыты эталонной электрической лаборатории ВМС, равно как и других исследователей, позволяют сделать следующие выводы:

1) Короткие замыкания нормальных элементов Вестона вызывали понижение электродвижущей силы, которая по окончании короткого замыкания более или менее быстро восстанавливается.

<sup>1</sup> International Standard of electromotive force and its low temperature coefficient form. „Transactions A. I. E. E.“, 1931.

ТАБЛИЦА I

№ элементов	Время приготовления	Внутрен. сопротивление в Ом/к	Продолжительность коротк. замык.	ЭДС до коротк. замык. в мВ/к/д. паронных водтах при 20°С	Неоср. по окончании коротк. зам.	Изменение электродвижущих сил после короткого замыкания в микровольт/к											
						Через 1 мин.	Через 5 мин.	Через 10 мин.	Через 30 мин.	Через 1 час.	Через 5 час.	Через 8 час.	Через 1 сут.	Через 3 сут.	Через 8 сут.	Через 1 мес.	
1138	V 1932 г.	550	1 сек.	1,018385	—	90	57	45	10	-15	3	—	—	—	—	—	—
508	XII 1929 г.	1590	1 мин.	1,018348	—	166	5	12	—	+18	—	—	—	+11	+14	—	—
1285	IX 1932 г.	—	•	1,018390	256	150	65	40	12	+7	+33	—	—	+31	+17	+9	—
1322	I 1933 г.	950	•	1,018395	196	50	6	0	6	+7	—	—	—	+6	+5	+5	—
1333 <sup>1</sup>	IV 1933 г.	440	•	1,018425	214	53	12	2	11	+13	—	—	—	+7	+18	+2	—
1242	IX 1932 г.	—	5 мин.	1,018379	393	303	136	98	62	-45	+5	—	—	+46	+49	+41	—
1281	XI 1932 г.	1650	•	1,018396	510	204	40	12	13	+21	—	—	—	+35	+32	+25	—
1448	X 1933 г.	720	•	1,018455	967	504	149	156	8	-1	—	—	—	-4	-7	-9	—
1056 <sup>1</sup>	XII 1931 г.	292	•	1,018355	714	331	45	6	8	+7	—	—	—	+8	8	—	—
1235	—	—	15 мин.	1,018399	—	429	138	57	24	-5	—	—	—	+85	+82	+69	+58
1322	—	—	•	1,018416	—	563	108	76	44	+5	—	—	—	+5	+4	—	0
1333	—	—	•	1,018439	—	475	—	84	10	+17	—	—	—	+52	+46	+20	+19
1281	—	—	30 мин.	1,018424	—	399	157	104	34	+2	—	—	—	+65	—	—	+29
1448	—	—	•	1,018460	—	1185	331	193	102	-37	—	—	—	+9	-7	—	-14
1056	—	—	•	1,018376	—	915	11	—	31	+45	+240 <sup>2</sup>	—	—	+189	—	+26 <sup>2</sup>	+5

1. Элементы № 1333 и № 1056 принадлежат к типу элементов с большой катодной поверхностью.  
 2. Через 4 часа после короткого замыкания.  
 3. Через 10 сут. после замыкания.



- 2) Степень изменения электродвижущей силы находится в зависимости от продолжительности короткого замыкания.
- 3) Элементы, подвергнувшиеся коротким замыканиям, обнаруживают колебания в электродвижущей силе и могут употребляться для точных измерений лишь после испытания их на устойчивость их значений.

*Ленинград, ВИМС, Эталонная электрическая лаборатория*

## L'INFLUENCE DES COURTS-CIRCUITS SUR LA FORCE ÉLECTROMOTRICE

Par E. S. Tchuraeva

(Résumé)

Cet article est consacré à l'étude des variations de la force électromotrice des éléments normaux Weston, survenues à la suite du court-circuit de ces derniers.

Les expériences, effectuées par l'auteur, le mettent en mesure de formuler les conclusions suivantes:

- 1) Les courts-circuits des électrodes des éléments normaux Weston occasionnaient un abaissement de la force électromotrice qui se rétablissait plus ou moins rapidement après le court-circuit.
- 2) Le degré de la variation de la force électromotrice dépend de la durée du court-circuit.
- 3) Les éléments en court circuit montrent des variations de la force électromotrice et ne peuvent être employés qu'après que des essais répétés auront établi la constance de leurs valeurs.

## О ДЕЛИТЕЛЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

С. В. Горбацевич

Делители высокого напряжения являются частью установки компенсационного аппарата Шеринга для измерения коэффициентов трансформации и углов сдвига в измерительных трансформаторах напряжения. Эти делители, один для максимального напряжения  $E=4000$  вольт, а другой для  $E=23000$  вольт, представляют собой сопротивления тонкой марганцевой проволоки, намотанной по призматической поверхности. Намотка произведена по способу Шапейрона для того, чтобы избежать емкостного эффекта. Что касается небольшой самоиндукции, то ее измерение при больших сопротивлениях до сих пор не производится с достаточной степенью точности, и в то же время теоретические подсчеты являются слишком сложными. Обычно в практике испытаний считают эти делители и безземкостными и безиндукционными и не вводят никаких поправок, с ними связанных, при подсчетах коэффициента трансформации и углов сдвига. Повышение точности трансформаторов требует повышения точности их поверки, и в связи с этим назрела необходимость в учете тех ошибок, которые вносятся делителем. С этой точки зрения упомянутые делители не удовлетворяют требуемой точности измерений. Можно идти двумя путями для достижения этой точности: 1) либо применять в качестве делителя такое сопротивление, которое будет безиндукционным и безземкостным в пределах требуемой точности, 2) либо применять в качестве делителя такое сопротивление, индуктивность и емкость которого были бы наперед известны с достаточной степенью точности.

Сопротивлением, удовлетворяющим первому условию, является водяной или какой-либо другой жидкостный реостат, индуктивность которого практически ничтожно мала. К сожалению, непостоянство этого сопротивления, сильно зависящее как от состава жидкости, так и от температуры, делает его непригодным для точной работы на компенсационном аппарате.

Что касается делителей, удовлетворяющих второму условию, то среди них следует отметить два: а) делитель Уильмотта, б) делитель Орлиха и Шульце.

а) Делитель, рассчитанный Уильмоттом,<sup>1</sup> представляет систему петлеобразных проводников, расположенных

<sup>1</sup> „Philosophical Magazine“, vol. 2, 1926.

параллельно друг другу на цилиндрической поверхности. Они окружены цилиндрическим металлическим экраном. Индуктивность этих делителей обычно рассчитывается по формуле, предложенной Броуном,

$$L = 4 \times 10^{-9} l \left[ 2,3026 \left( \lg_{10} \frac{D}{d} \right) + \frac{1}{4} \right] \text{ генри,}$$

где  $D$  — расстояние между проводами,  $r$  — радиус провода,  $l$  — длина провода.

Если проводники расположены вблизи экрана, расчет емкости может быть произведен достаточно точно по формулам:

$$C_{om} = \frac{1}{p} \left\{ 1 + \frac{p^2(1-p)}{p} \sum_{q=1}^n \frac{1}{\sin^2 \left( \frac{1}{2} \theta_{m,q} \right)} \right\},$$

$$C_{m,r} = \frac{1}{p^2} \left\{ \frac{p^2(1-p)}{\sin^2 \left( \frac{1}{2} \theta_{m,r} \right)} - \frac{p^4}{p} \sum_{q=1}^n \frac{1}{\sin^2 \left( \frac{1}{2} \theta_{r,q} \right) \sin^2 \left( \frac{1}{2} \theta_{m,q} \right)} \right\}.$$

где  $C$  — емкость,  $p$  — потенциальные коэффициенты,  $\theta$  — полярная координата петли и  $r$  величина, близкая к единице.

Эти выводы имеют место при высоких частотах и для случая, когда проводники расположены по внутренней полости экрана; однако при обычных технических частотах эффект емкости ставится иным.

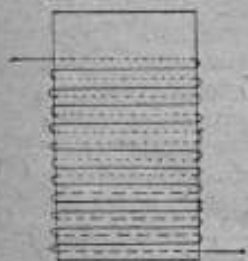


Рис. 1.

Последнее обстоятельство, а также затруднения в постройке делителей Уильмотта при высоких напряжениях, ведет к тому, что применение этих делителей для испытаний измерительных трансформаторов напряжения не может считаться удобным.

б) Делитель Орлиха и Шульце. Делитель Орлиха и Шульце в своем элементарном виде представляет проволоку, намотанную на фарфоровую трубу и окруженную цилиндрическим экраном (рис. 1).

Расчет этого делителя дан Орлихом и Шульце в „А. і. Е.“ Вд. I, 1912, стр. 1!

Ниже остановимся на этом расчете, с той лишь разницей, в его теоретические основания будут внесены некоторые дополнения, которые, по мнению автора, должны увеличить точность подсчета индуктивных и емкостных сдвигов сопротивления.

В своей теории делителя высокого напряжения, опубликованной в „А. і. Е.“, Орлих и Шульце исходят из частных случаев телеграфных уравнений

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = r_1 I \quad (1) \quad \text{и} \quad -\frac{\partial I}{\partial x} = j\omega c_1 U \quad (2)$$

где  $r_1 = r e^{j\alpha}$  и  $c_1 = c e^{j\beta}$ , причем  $r$  — сопротивление на единицу длины трубы, вдоль которой намотана обмотка сопротивления,  $c$  — емкость обмотки по отношению к окружающей среде,  $\omega$  — круговая частота,  $U$  — вектора напряжения,  $I$  — вектор тока,  $\alpha$  и  $\beta$  — углы сдвига, вызываемые самоиндукцией и потерями в диэлектрике.

Если учитывать не только активное сопротивление, емкость и углы сдвигов, им вызываемые, но и самоиндукцию  $L$  и проводимость изоляции  $g$ , то уравнения принимают следующий вид:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + (r + j\omega L) I = 0, \quad (1')$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + (g + j\omega c) U = 0 \quad (2')$$

Здесь  $U$  и  $I$  — вектора напряжения и тока — предполагаются синусоидальными и в аналитическом выражении являются следовательно величинами комплексными,

$r$  — активное сопротивление,

$L$  — коэффициент самоиндукции,

$g$  — проводимость изоляции,

$c$  — емкость.

Все эти величины распределены по всему сопротивлению и считаются на единицу длины.

Обозначим для краткости:

$$r + j\omega L = z \quad \text{и} \quad g + j\omega c = y,$$

здесь  $z$  и  $y$ , следовательно, будут величины комплексные.

Для того чтобы определить  $U$  и  $I$  в функции  $x$  из системы дифференциальных уравнений (1) и (2), дифференцируем второе уравнение по  $x$ , имеем, принимая сокращенные обозначения:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + y \frac{\partial U}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -zI,$$

следовательно

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - zyI = 0 \quad (3)$$

Характеристическое уравнение этого последнего будет

$$u^2 - zy = 0$$

и корни его

$$u_{1,2} = \pm \sqrt{zy} = \pm \sqrt{m_1 + jn_1},$$

где  $m_1$  и  $n_1$  — вещественный и мнимый коэффициенты выражены

$$m_1 = ra - \omega^2 Lc \text{ и } n_1 = \omega(La + rc)$$

Таким образом, решение уравнения (3) имеет вид

$$I = A_1 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} x} + A_2 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} x}$$

Это последнее и дает зависимость силы тока вдоль соприкосновения от длины последнего.

Дифференцируя (4) по  $x$  и подставляя  $\frac{dI}{dx}$  в уравнение (2) ходим:

$$U = (A_2 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} x} - A_1 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} x}) \sqrt{\frac{z}{y}}$$

Произвольные постоянные должны быть определены из граничных условий.

Пусть при  $x=0$   $U_{x=0} = U_0$  и  $I_{x=0} = I_0$  и при  $x=l$   $U_{x=l} = U_e$  и  $I_{x=l} = I_e$ .

Тогда имеем

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= \sqrt{\frac{z}{y}} (A_2 - A_1); & I_0 &= A_1 + A_2; \\ U_e &= \sqrt{\frac{z}{y}} (A_2 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} l} - A_1 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} l}); \\ I_e &= A_1 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} l} + A_2 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} l}. \end{aligned} \right\}$$

Из уравнений (5) легко определить  $A_1$  и  $A_2$  либо через  $I_0$  либо через  $I_e$  и  $U_e$ . Решая (5), находим:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{I_0 - U_0 \sqrt{\frac{y}{z}}}{2} = \left( \frac{I_e - U_e \sqrt{\frac{y}{z}}}{2} \right) e^{+\sqrt{m_1 + jn_1} l}; \\ A_2 &= \frac{I_0 + U_0 \sqrt{\frac{y}{z}}}{2} = \left( \frac{I_e + U_e \sqrt{\frac{y}{z}}}{2} \right) e^{+\sqrt{m_1 + jn_1} l}. \end{aligned} \right\}$$

Перемножая уравнение (6), получаем простую зависимость между токами и напряжениями в начале и в конце сопротивления

$$I_0^2 - I_e^2 = (U_0^2 - U_e^2) \frac{Y}{Z} \quad (7)$$

Наконец, из уравнений (6) легко получить зависимость

$$\begin{aligned} I_0 &= f_1(U_0, U_e), & I_e &= f_2(U_0, U_e), \\ U_0 &= F_1(I_0, I_e) & \text{и} & U_e = F_2(I_0, I_e) \end{aligned}$$

Все эти выражения хотя и несложны, но не позволяют достаточно просто определить угол сдвига между падением напряжения на сопротивлении и током в начале или в конце сопротивления в зависимости от параметров последнего.

Решение задачи было найдено Орлихом и Шульце („А. Г. Е.“, т. I, 1912).

Упомянутые авторы предложили началу сопротивления сообщать разность потенциалов по отношению к земле. Эта разность потенциалов будет составлять какую-то  $K$ -ую часть падения напряжения вдоль всего сопротивления.

Если  $U_0$  — разность потенциалов между началом сопротивления и землей,  $U_e - U_0$  падение напряжения на сопротивлении, то имеем

$$U_0 = K(U_0 - U_e). \quad (8)$$

Это может быть достигнуто включением дополнительного сопротивления между началом сопротивления делителя и землей. Совершенно очевидно, что  $K$  есть не что иное, как отношение включенного дополнительного сопротивления к сопротивлению делителя; это отношение в общем случае будет величиной комплексной, и от выбора  $K$  зависят величина и характер включаемого дополнительного сопротивления.

Пользуясь выражением (8) и (5), можно найти сдвиг фаз между током в начале сопротивления делителя и падением напряжения на нем.

Формулы гиперболической тригонометрии дают следующую зависимость:

$$e^x = \operatorname{ch} x + \operatorname{sh} x \quad \text{и} \quad e^{-x} = \operatorname{ch} x - \operatorname{sh} x. \quad (9)$$

Следуя примеру Орлиха, получаем для  $U_e$  и  $I_e$  следующие выражения:

$$\begin{aligned} U_e &= -\sqrt{\frac{z}{y}} \left[ (A_1 - A_2) \operatorname{ch} \sqrt{m_1 + jn_1} l + (A_1 + A_2) \operatorname{sh} \sqrt{m_1 + jn_1} l \right] \\ I_e &= (A_1 + A_2) \operatorname{ch} \sqrt{m_1 + jn_1} l + (A_1 - A_2) \operatorname{sh} \sqrt{m_1 + jn_1} l \quad (10) \end{aligned}$$

Формулы 5, 8 и 10 дают возможность найти отношение

$$\frac{U_0 - U_e}{I_0},$$

причем постоянные  $A_1$  и  $A_2$  исключаются. Элементарные преобразования приводят к следующему выражению:

$$\frac{U_0 - U_e}{I_0} = \sqrt{\frac{z}{y}} \left\{ \frac{\text{sh} \sqrt{m_1 + jn_1} l}{1 + K \text{ch} \sqrt{m_1 + jn_1} l - K} \right\}$$

В дальнейших выкладках для простоты введем обозначения:

$$\sqrt{m_1 + jn_1} = \sqrt{zy} = m \quad \text{и} \quad \sqrt{\frac{z}{y}} = n$$

Тогда имеем

$$\frac{U_0 - U_e}{I_0} = n \frac{\text{sh} ml}{1 + K \text{ch} ml - K}$$

Разложив в ряд Маклорена  $\text{sh} mx$  и  $\text{ch} mx$ , получаем:

$$\frac{U_0 - U_e}{I_0} = n \frac{ml + \frac{m^3 l^3}{3!} + \frac{m^5 l^5}{5!} + \dots}{1 + K + K \frac{m^2 l^2}{2!} + K \frac{m^4 l^4}{4!} + \dots - K}$$

Разделив числителя и знаменателя в правой части формулы (12) по правилу деления многочлена на многочлен и отбрасывая члены высших порядков, имеем:

$$\frac{U_0 - U_e}{I_0} = mn l \left[ 1 + \left( \frac{1}{6} - \frac{K}{2} \right) m^2 l^2 + \left( \frac{1}{120} - \frac{K}{8} + \frac{K^2}{4} \right) m^4 l^4 \right]$$

Вспоминая прежние обозначения, имеем:

$$mn = r + j\omega L \quad \text{и} \quad m = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega c)},$$

и формула 13 имеет вид

$$\frac{U_0 - U_e}{I_0} = (r + j\omega L) l \left[ 1 + \left( \frac{1}{6} - \frac{K}{2} \right) (r + j\omega c)(g + j\omega L) l^2 + \right. \\ \left. + \left( \frac{1}{120} - \frac{K}{8} + \frac{K^2}{4} \right) (r + j\omega L)^2 (g + j\omega c)^2 l^4 \right]$$

Если  $r$ ,  $L$ ,  $a$  и  $c$  рассчитаны не на единицу длины, а на длину, то в формулу (14)  $l$  не войдет.

<sup>1</sup> Оба степенных ряда являющимися



Для большей простоты преобразуем (14) к показательному, а затем к тригонометрическому виду.  
Для этого обозначим  $K = K_1 + jK_1K_2$ ,

$$\left. \begin{aligned} r + j\omega L &= ze^{j\alpha}, \text{ где } \operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L}{r} \\ g + j\omega c &= ye^{-j\beta}, \text{ где } \operatorname{tg} (-\beta) = \frac{\omega c}{g} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$r, L, g$  и  $c$  отнесены ко всей длине. Коэффициент мнимой части  $K$  обозначен через  $K_1K_2$  ради удобства дальнейших выкладок.

Тогда имеем

$$\begin{aligned} \frac{U_0 - U_e}{k} &= ze^{jx} + zy^2 \left[ \frac{1}{6} - \frac{(K_1 + jK_1K_2)}{2} \right] e^{j(2x - \beta)} + \left[ \frac{1}{120} - \frac{(K_1 + jK_1K_2)}{8} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(K_1 + jK_1K_2)^2}{4} \right] y^2 z^3 e^{j(3x - 2\beta)} = z \cos \alpha + jz \sin \alpha + \\ &\quad + yz^2 \left( \frac{1}{6} - \frac{K_1}{r} \right) \cos(2x - \beta) - jyz^2 K_1 K_2 \cos(2x - \beta) + \\ &\quad + jyz^2 \left( \frac{1}{6} - \frac{K_1}{2} \right) \sin(2x - \beta) + yz^2 K_1 K_2 \sin(2x - \beta) + O_1(y^2) + \\ &\quad + iO_2(y^2)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

Найдем теперь условия, при которых сдвиг между  $U_0 - U_e$  и  $I_0$  либо отсутствует, либо будет величиной ничтожно малой (порядка  $y^2$ ). Для этого подчиним коэффициенты при  $j$  двум условиям:

$$\frac{1}{6} - \frac{K_1}{2} = 0, \quad z \sin \alpha - yz^2 K_1 K_2 \cos(2x - \beta) = 0$$

$$3x - 2\beta = 0. \quad (17)$$

Из (17) имеем:

$$K_1 = \frac{1}{3} \quad (18)$$

$K_2 \ll K_1$  и с большой степенью точности будем считать  $\operatorname{mod} [K_1 + jK_1K_2] = K_1$

$$O_1(y^2) = + \left[ \left( \frac{1}{120} - \frac{K_1 + jK_1K_2}{8} + \frac{(K_1 + jK_1K_2)^2}{4} \right) y^2 z^3 \cos(3x - 2\beta) \right]$$

$$O_2(y^2) = + \left[ \left( \frac{1}{120} - \frac{K_1 + jK_1K_2}{8} + \frac{(K_1 + jK_1K_2)^2}{4} \right) y^2 z^3 \sin(3x - 2\beta) \right]$$

(условие, к которому приходит Орлик),

$$\beta = \frac{3}{2} \alpha$$

и

$$z \sin \alpha - yz^2 K_1 K_2 \cos \left( 3\alpha - \frac{3}{2} \alpha \right) = 0.$$

Преобразуя последнее равенство и сократив его на общий множитель, имеем:

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} = yz K_1 K_2$$

Полагая  $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$ , имеем:

$$\alpha = yz K_1 K_2,$$

где  $y$ ,  $z$ ,  $K_1$  и  $K_2$  суть величины вещественные.<sup>1</sup>

При таком выборе постоянного делителя членом, вносящим некоторый сдвиг между током  $I_0$  в начале сопротивления и падением напряжения  $U_0 - U_z$  вдоль него, будет  $O_1(y^2)$ . Определим эту погрешность

$$O_1(y^2) = + \left( \frac{1}{120} - \frac{K_1}{8} + \frac{K_1^2}{4} - \frac{K_1^2 K_2^2}{4} \right) y^2 z^3 \cos(3\alpha - 2\beta) - \\ - j \left( \frac{K_1 K_2}{8} - \frac{K_1^2 K_2}{2} \right) y^2 z^3 \cos(3\alpha - 2\beta)$$

Обозначая вышеупомянутый угол сдвига через  $\Delta\varphi$ , имеем

$$\operatorname{tg}(\Delta\varphi) \approx \frac{\left( \frac{K_1 K_2}{8} - \frac{K_1^2 K_2}{2} \right) y^2 z^3}{z} = \frac{-K_1 K_2 y^2 z^2}{2} \left( \frac{1}{4} - K_1 \right)$$

при

$$K_1 = \frac{1}{3}; \operatorname{tg}(\Delta\varphi) = + \frac{1}{72} K_2 y^2 z^2.$$

Таким образом при  $K_1 \approx K = \frac{1}{3}$  имеем:

$$\alpha = \frac{1}{3} yz K_2 \text{ и } \operatorname{tg}(\Delta\varphi) \approx \Delta\varphi = + \frac{1}{72} K_2 y^2 z^2 = + \frac{1}{72} K_2 y^2 z^2 \frac{\frac{1}{3} yz K_2}{\frac{1}{3} yz K_2} = + \frac{1}{24} K_2 y^2 z^2$$

<sup>1</sup>  $y$  и  $z$  суть модуль проводимости и сопротивления;  $K_1$  и  $K_2$  суть коэффициенты комплексного множителя  $K$ .

Из произведенных примерных подсчетов для одного варианта делителя следует, что при  $\alpha = 2,37$   $C = 1,36 \cdot 10^{-10}$  фарад и  $r = 130\,000$  омов,  $\Delta\varphi = 5,5 \cdot 10^{-4}$  мин.

Окончательное выражение для величины отношения падения напряжения к току имеет следующий вид:

$$\frac{U_a - U_c}{I_0} = z \cos \varphi + \frac{1}{3} y z^2 \sin \frac{\pi}{2} - \left( \frac{1}{180} + \frac{1}{36} K_2^2 \right) y^2 z^3 - \\ - j \frac{1}{72} y^2 z^3 \approx r + \frac{1}{3} y z^2 \frac{\pi}{2} = r + \frac{1}{6} \alpha y z^2 \quad (25)$$

Рассмотрим теперь случай, когда несколько труб сопротивлений соединены последовательно. Этот случай имеет место тогда, когда напряжение испытуемого трансформатора потребовало бы слишком длинной трубы сопротивления (например, больше одного метра). Тогда приходится приключать к высокому напряжению несколько труб сопротивлений.

Подсчеты углов сдвигов в этом случае несколько усложняются. Принимая прежние обозначения, имеем:

$$\frac{I_e}{I_0} = \frac{A_1 \sqrt{m_1 + jn_1} + A_2 e^{-\sqrt{m_1 + jn_1} l}}{A_1 + A_2} = \text{ch } \sqrt{m_1 + jn_1} l + \\ + \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \text{sh } \sqrt{m_1 + jn_1} l = \frac{\text{ch } \sqrt{m_1 + jn_1} l + K (1 - \text{ch } \sqrt{m_1 + jn_1} l)}{(1 - K) (1 - \text{ch } \sqrt{m_1 + jn_1} l)}$$

Обозначая, как и ранее,  $\sqrt{m_1 + jn_1} = m$ , разлагая  $\text{ch } mx$  в ряд Маклорена и отбрасывая члены выше четвертого порядка, получаем:

$$\frac{I_e}{I_0} = \frac{1 + \frac{m^2 l^2}{2!} + \frac{m^4 l^4}{4!} + K - K - K \frac{m^2 l^2}{2!} - K \frac{m^4 l^4}{4!}}{1 - K + K + K \frac{b^2 l^2}{2!} + K \frac{b^4 l^4}{4!}} = 1 + \frac{m^2 l^2}{2!} (1 - 2K) + \\ + \frac{m^4 l^4}{4!} (1 - 8K + 12K^2)$$

Если  $r$ ,  $L$ ,  $g$  и  $C$  рассчитаны на всю длину, то по аналогии с прежними выводами можем написать:

$$\frac{I_e}{I_0} = 1 + \frac{2y}{3} \left[ \cos(\alpha - \beta) + j \sin(\alpha - \beta) \right] (1 - 2K_1 - 2jK_1 K_2) + \\ + \frac{2^2 y^2}{24} \left[ \cos(2\alpha - 2\beta) + j \sin(2\alpha - 2\beta) \right] \left[ 1 - 8K_1 - 8jK_1 K_2 + \right. \\ \left. + 12(K_1 + jK_1 K_2)^2 \right] \quad (26)$$

Пренебрегая членами, содержащими  $z^2 y^2$  ( $z^2 \ll \frac{1}{y^2}$ ), имеем

$$\operatorname{tg}(I_e, I_0) = \frac{\left\{ \sin(\alpha - \beta) \left[ 1 - 2K_1 \right] - 2K_1 K_2 \cos(\alpha - \beta) \right\} \frac{zy}{2}}{1 + \frac{zy}{2} \cos(\alpha - \beta) \left[ 1 - 2K_1 \right] + \frac{zy}{2} \sin(\alpha - \beta) 2K_1 K_2}$$

Если этот угол подчинить условию минимума угла  $\angle(U_0 - U_1)$ , то  $\beta = \frac{3}{2}\alpha$  и

$$\operatorname{tg}(I_e, I_0) \approx \frac{\left[ (2K_1 - 1) \sin \frac{\alpha}{2} - 2K_1 K_2 \cos \frac{\alpha}{2} \right] \frac{zy}{2}}{1 + \frac{zy}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \left[ 1 - 2K_1 \right]}$$

так как  $\frac{zy}{2} \sin(\alpha - \beta) 2K_1 K_2$  очень мало по сравнению с первыми двумя членами знаменателя.

Независимо от величин углов  $\alpha$  и  $\beta$  угол  $\angle(I_e, I_0) \approx 0$ , если

$$\operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{2K_1 K_2}{2K_1 - 1}$$

Найдем теперь угол сдвига  $\angle(U_0 - U_1, I_0)$ .

Можно с большой степенью точности пренебречь вторым членом знаменателя для  $\angle(I_e, I_0)$  и, обозначая  $\operatorname{tg}(I_e, I_0) = \operatorname{tg} \delta$ , имеем

$$\operatorname{tg} \delta = \left\{ (2K_1 - 1) \sin \frac{\alpha}{2} - 2K_1 K_2 \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \frac{zy}{2}$$

Обозначим угол  $\angle(U_0 - U_1, I_0)$  через  $\varphi$ ; тогда по формуле (1) имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{z \sin \alpha - yz^2 K_1 K_2 \cos(2\alpha - \beta) + yz^2 \left( \frac{1}{6} - \frac{K_1}{2} \right) \sin(2\alpha - \beta)}{z \cos \alpha + yz^2 \left( \frac{1}{6} - \frac{K_1}{2} \right) \cos(2\alpha - \beta) + yz^2 K_1 K_2 \sin(2\alpha - \beta)}$$

Сокращая на  $z$ , полагая  $\beta = \frac{3}{2}\alpha$  и  $\cos \alpha \approx 1$  и пренебрегая остальными членами знаменателя по сравнению с  $\cos \alpha \approx 1$ , имеем

$$\operatorname{tg} \varphi = \sin \alpha - yz K_1 K_2 \cos \frac{\alpha}{2} - yz \left( \frac{1}{6} - \frac{K_1}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2}$$

<sup>1</sup> В дальнейшем индексы 0, 1 — 2, 3 и т. д. будут обозначать начало и конец первой трубы сопротивления, начало и конец второй трубы сопротивления и т. д.

Имея в виду формулу (28) и полагая  $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$  и  $\operatorname{tg} \delta \approx \delta$ , получим:

$$\varphi - \delta = \sin \alpha - zy \sin \frac{\alpha}{2} \left[ \frac{1}{6} - \frac{K_1}{2} + K_1 - \frac{1}{2} \right] = \sin \alpha - zy \sin \frac{\alpha}{2} \left[ \frac{K_1}{2} - \frac{1}{3} \right]$$

(рис. 2—а, б, с).<sup>1</sup>

Примем следующие обозначения для углов сдвигов  $n$ -й трубы:

$$\delta_n = \angle(I_n, I_{n-1}); \varphi_n = \angle(\delta U_n, I_{n-1}); \delta_n - \varphi_n = \angle(I_n, \delta U_n).$$

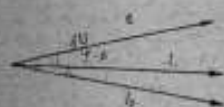
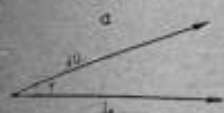


Рис. 2.

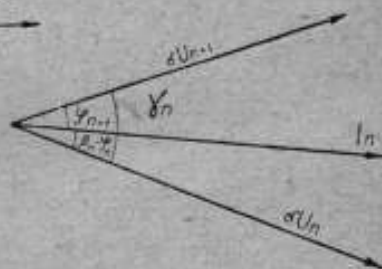


Рис. 3.

Тогда  $\angle(\delta U_{n-1}, \delta U_n) = \varphi_{n-1} + \delta_n - \varphi_n = \tau_n$  (рис. 3).<sup>2</sup>

Имеем таким образом следующие выражения для угла  $\tau_n$ :

$$\begin{aligned} \tau_n = \sin \alpha - yz K_{1(n+1)} K_{2(n-1)} \cos \frac{\alpha}{2} - yz \left( \frac{1}{6} - \frac{K_{1(n-1)}}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2} + \\ + [2K_{1(n)} - 1] \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{zy}{2} - zy K_{1(n)} K_{2(n)} \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \alpha + yz K_{1(n)} K_{2(n)} \cos \frac{\alpha}{2} + \\ + yz \left( \frac{1}{6} - \frac{K_{1(n)}}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2} = yz \sin \frac{\alpha}{2} \left[ \frac{1}{6} - \frac{K_{1(n)}}{2} - \frac{1}{6} + \frac{K_{1(n+1)}}{2} + K_{1(n)} - \frac{1}{2} \right] - \\ - yz \cos \frac{\alpha}{2} K_{1(n+1)} K_{2(n+1)} = \frac{1}{2} yz \sin \frac{\alpha}{2} [K_{1(n+1)} + K_{1(n)} - 1] - \\ - yz \cos \frac{\alpha}{2} K_{1(n-1)} K_{2(n-1)} \quad (30) \end{aligned}$$

<sup>1</sup> На рис. 2 б, с и рис. 3 вместо  $\delta$  следует читать  $\delta$ .

<sup>2</sup> Индексы у  $K_1$  и  $K_2$  в скобках указывают номер трубы сопротивления.

Угол  $\gamma$  между напряжением  $\delta U$  на сопротивлении всех делителя и напряжением  $\delta U_1$  на сопротивлении первой трубы делителя может быть выражен следующей формулой:

$$\begin{aligned} \angle(\delta U, \delta U_1) &= \gamma = \frac{1}{n} [\gamma_1(n-1) + \gamma_2(n-2) + \dots + \gamma_{n-1}] = \\ &= \frac{yz}{2} \sin \frac{\alpha}{2} \left[ \left(1 - \frac{1}{n}\right) K_{1(1)} + \left(2 - \frac{3}{n}\right) K_{1(2)} + \left(2 - \frac{5}{n}\right) K_{1(3)} + \dots + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{n} K_{1(n-1)} + \frac{1}{n} K_{1(n)} - \frac{n-1}{n} \right] - yz \cos \frac{\alpha}{2} \left[ K_{1(1)} K_{2(1)}(n-1) + \right. \\ &\quad \left. + K_{1(2)} K_{2(2)}(n-2) + \dots + K_{1(n)} K_{2(n)} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \angle(\delta U, I_0) &= \angle(\delta U, \delta U_1) + \angle(\delta U_1, I_0) = \sin \alpha - yz K_1 K_2 \cos \frac{\alpha}{2} = \\ &= \sin \alpha - yz \left( \frac{1}{b} - \frac{K_1}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2} + \gamma \end{aligned}$$

Если к началу сопротивления первой трубы делителя подключить эталонное сопротивление, то можно считать, что падение напряжения на нем  $\delta U$  и ток в начале сопротивления будут в фазе. Подавая это напряжение на компенсационный аппарат, можно, следовательно, вычислить угол сдвига  $\angle(\delta U, \delta U_1)$  по формуле 31.

Ленинград, ВИМС, Лаборатория переменного тока

## LES DIVISEURS DE HAUTE TENSION

par S. V. Gorbatsévitch

(Résumé)

L'auteur examine quelques-uns des types de diviseurs de haute tension et plus particulièrement le diviseur d'Orlich et Schultze.

Les équations différentielles initiales ont été prises dans leur forme complète et l'on a déduit plusieurs nouveaux rapports permettant de calculer le diviseur d'Orlich et Schultze avec une précision plus grande.

## К ВОПРОСУ О НАИМЕНОВАНИИ ЕДИНИЦЫ ЧАСТОТЫ

М. Ф. Маликов

В 1932 г. Всесоюзным комитетом стандартизации был утвержден ОСТ 5037 „Единицы частоты“, которым в научную и техническую практику СССР введена единица частоты „герц“, с кратными „килогерц“ и „мегагерц“, причем единица „герц“ определена как „частота периодически изменяющейся во времени величины, период которой равен одной средней солнечной секунде“. Мотивом для принятия этого стандарта, разработанного Всесоюзным институтом метрологии и стандартизации (ВИМ) в 1931 г., послужило обсуждение вопроса о выборе наименования единицы частоты на пленарном собрании Международной электротехнической комиссии (МЭК), состоявшемся в июле 1930 г. в Стокгольме. Еще до этого собрания центральное бюро МЭК в ноябре 1928 г. разослало национальным электротехническим комитетам на обсуждение предложение германского Электротехнического комитета принять в качестве международного наименования для единиц частоты термин „герц“ — в честь знаменитого ученого Heinrich Hertz'a, много работавшего в области получения электромагнитных колебаний. В январе 1930 г. были получены ответы от 16 стран, из которых 9 стран (Австрия, Бельгия, Голландия, Дания, Испания, Румыния, Франция, Швеция и Чехия) высказались в пользу принятия наименования „герц“, а 7 стран (Англия, Канада, Италия, Норвегия, Польша, США и Швейцария) высказались против, главным образом по той причине, что в практику вошло уже наименование „цикл в секунду“ и его сокращенно „цикл“ (и „килоцикл“) и что введение вместо привычного термина нового, который надо запоминать, нежелательно. Вопрос этот обсуждался также в различных учреждениях СССР, причем большинство высказалось в пользу принятия термина „герц“. За то же наименование высказалась и конференция научной метрологии, состоявшаяся в мае 1930 г. в Ленинграде.

При рассмотрении вопроса в пленарном собрании МЭК в Стокгольме в пользу принятия наименования „герц“ высказалось незначительное большинство (10 стран — в том числе СССР — за, 8 — против, при одной воздержавшейся). Ввиду того, что, по установившемуся обычаю, принятыми считались только те предложения, за которые высказывались единогласно,



почти единогласно, вопрос остался открытым и было предложено передать его МЭК на дальнейшее изучение в компетентной комиссии.

Тем не менее, когда поставлен был вопрос об издании ОСТ для единицы частоты, ВИС остановился в своем проекте на наименовании единицы частоты „герц“ предпочтительно перед другими возможными ее наименованиями на основании следующих соображений.

Применение термина „период в секунду“ для единицы частоты, имеющей размерность  $[T^{-1}]$ , является неправильным, так как этот термин дает выражение частоты в виде отвлеченного числа.

Термин „цикл“ („килоцикл“) по существу тоже неправилен, так как он представляет лишь сокращение правильного термина: „цикл в секунду“ („килоцикл в секунду“). По сравнению с последним термином термин „герц“ имеет преимущество краткости.

Принятие для единицы частоты наименования „герц“ — в честь ученого Heinrich Hertz'a — находится в полном соответствии с практикой установления наименований для электрических единиц („ом“, „ампер“, „вольт“ и т. д.), имея в виду, что главное применение новая единица должна найти именно в электротехнике.

Наконец, за наименование „герц“ представители СССР уже высказались на стокгольмском собрании МЭК, и это наименование не вызвало возражений среди различных организаций СССР, что и подтвердилось затем отзывами на разосланный для согласования проект стандарта.

В качестве сокращенных обозначений приняты символы: Hз и гц.<sup>1</sup>

Принятие ОСТ 5037 при той обстановке, которая создалась после пленарного заседания МЭК в июле 1930 г. в Стокгольме, является смелым решением вопроса, так как оно предполагало обоснованную уверенность в том, что термину „герц“ принадлежит будущее в качестве международного наименования единицы частоты. И факты наших дней вполне оправдали эту уверенность.

В октябре 1933 г. в Париже состоялось собрание секции В электрических и магнитных величин и единиц Комитета № 1 по изучению номенклатуры МЭК,<sup>2</sup> в состав которой входило 13 представителей различных национальных электротехнических комитетов, причем присутствовало 11 представителей.<sup>3</sup> На этом собрании рассматривалось предложение итальянского Электро-

<sup>1</sup> В августе 1931 г. итальянский Электротехнический комитет наряду с сокращенным обозначением Hз предложил инициальный вариант HH, соответствующий инициалам Heinrich Hertz'a.

<sup>2</sup> Commission électrotechnique internationale, Comité d'Etudes № 1 de la Nomenclature Section B. Grandeurs et Unités électriques et magnétiques.

<sup>3</sup> Отсутствовали представители комитетов СССР (акад. В. Ф. Миткевич) и Норвегии.

технического комитета вернуться к обсуждавшемуся уже раз в МЭК вопросу о наименовании единицы частоты „герц“ ввиду того, что этот вопрос уже созрел для новой международной дискуссии, ибо тенденция к применению этого термина в различных государствах все более и более усиливается. Против предложения итальянского комитета довольно категорически высказались представители английского и американского Электротехнических комитетов, так как, по их мнению, никакого особого имени для единицы частоты не нужно, ибо выражения „цикл в секунду“ или „период в секунду“ понятны сами по себе. Да и они приводили довольно странный мотив, что единице частоты нельзя присвоить имя „герц“, так как частота не была открыта Герцем.<sup>1</sup> Тем не менее они считали допустимым присвоить наименование „герц“ единице частоты, численно равной 1 миллиону циклов в секунду, что вызвало возражение представителя германского Электротехнического комитета, который заметил, что термин „герц“ там, где он уже приобрел право гражданства, относится как раз к единице, равной одному циклу в секунду и поэтому совершенно невозможно его присвоить новой единице в миллион раз большей.

После обмена мнениями и постановки вопроса на голосование собрание 7 голосами (Германия, Голландия, Испания, Италия, Польша, Румыния и Франция) против 3 (Англия, США и Япония) при одном воздержавшемся (Швеция) вынесло постановление рекомендовать принятие наименования „герц“ для единицы частоты, равной 1 циклу в секунду, высказав в то же время пожелание, чтобы это постановление было подвергнуто обсуждению в национальных электротехнических комитетах, представив им для этого установленный шестимесячный срок.

Обсудив указанное постановление, шведский Электротехнический комитет (представитель которого воздержался от голосования в Париже в октябре 1933 г.) в марте 1934 г. известил о своем согласии на принятие наименования „герц“. В мае 1934 г. английский Электротехнический комитет (представитель которого высказался в Париже против термина „герц“) известил о своем согласии на принятие наименования „герц“, если действительно нужно дать особое имя единице частоты, равной 1 циклу в секунду, но с оговоркой, что он остается при своем прежнем мнении, что необходимости в особом наименовании он не видит.

Так как в СССР наименование единицы частоты „герц“ уже установлено стандартом, то оказывается, что из 12 национальных электротехнических комитетов, имевших представителей в секции В Комитета № 1 по изучению номенклатуры МЭК

<sup>1</sup> Следует заметить, что подобным мотивом никогда не руководствовались при установлении наименований других электрических единиц. Так, например наименование „ватт“ присвоено единице мощности в честь W a t t 'а, изобретателя паровой машины, который, однако, вопросом о мощности не занимался.

10 комитетов высказались в пользу наименования „герц“ и только два комитета (США и Япония) — против этого наименования.<sup>1</sup>

Таким образом можно с полной уверенностью считать, что термину „герц“ обеспечено международное признание в качестве наименования единицы частоты.

Как следует из определения герца, приведенного в начале настоящей статьи, эта единица распространяется не только на область электрических периодических величин, но вообще на все физические и механические периодические величины, так что герц является универсальной единицей частоты, имеющей размерность  $[T^{-1}]$ .<sup>2</sup>

Опыт двухлетнего применения ОСТ 5037 показывает, что эта единица основательно входит в научно-технический обиход СССР; она уже принята целиком в области акустики и в области переменных токов технической частоты. К сожалению, приходится констатировать, что в радиотехнической практике, равно как и в радиотехнической прессе, для которых эта единица главным образом предназначалась, до сих пор еще широко пользуются наименованием „цикл“ (и „килоцикл“). Надо пожелать, чтобы эта ненормальность была возможно скорей изжита, и во всех областях науки и техники СССР было принято единое наименование единицы частоты „герц“ с его кратными: „килогерц“ и „мегагерц“, — наименование, которому предстоит бесспорная международная будущность.

Ленинград, ВИМС, Эталонная электрическая лаборатория

<sup>1</sup> Мнение норвежского Электротехнического комитета не выяснено.

<sup>2</sup> Следует здесь рассеять одно недоумение, которое иногда встречается в технической практике, а именно: распространить ли термин „герц“ и на выражение угловой скорости (скорости вращения), которая в системах механических единиц (*LMT*) имеет ту же размерность, что и частота, и которая обычно выражается числом оборотов в секунду или в минуту. Надо твердо помнить, что частота и угловая скорость суть величины, совершенно различные по природе. Частота характеризует периодичность процесса, а угловая скорость — изменение угла вращения в единицу времени и в большинстве случаев (наиболее важных с практической точки зрения) есть величина постоянная (равномерное вращение). Хотя вращение и можно рассматривать как периодический процесс, но скорость вращения не будет периодическим явлением и потому не должна выражаться в герцах; угловая скорость должна выражаться так, как это общепринято в научной практике (радиан в секунду) или в технической практике (число оборотов в секунду или в минуту).

SUR LA DÉNOMINATION DE L'UNITÉ DE FRÉQUENCE

Par M. F. Malikov

(Résumé)

Cet aperçu est basé sur les matériaux de la Commission électrotechnique internationale et des Comités électrotechniques nationaux.

En 1932 le nom de „hertz" fut officiellement sanctionné dans l'U.R.S.S. par la publication du standard: „Unités de fréquence". On avait prévu que ce nom acquerra la portée d'une dénomination internationale; vers 1934 on a déjà pu constater, que la majorité des Comités électrotechniques nationaux s'était déclarée pour le nom „hertz".

---



## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Ф. Н. Николаев. Теория погрешностей потенциометров . . . . .	5
А. А. Чечулин. О возможности применения электронной лампы для измерения напряжения с повышенной точностью. . . . .	32
А. А. Чечулин. Измерение реактивных сопротивлений при помощи лампового вольтметра и потенциометра постоянного тока. . . . .	47
А. А. Павлова. Методы поверки и испытания потенциометров, применяемые в лаборатории постоянного тока ВИМСа. . . . .	58
Г. А. Кьяндский. Измерение длины волны в диапазоне ультракоротких волн. . . . .	81
А. И. Маренина. Образцовые катушки сопротивления. . . . .	92
Е. С. Чураева. Влияние коротких замыканий на электродвижущую силу нормального элемента. . . . .	97
С. В. Горбачевич. О делителях высокого напряжения. . . . .	105
М. Ф. Маликов. К вопросу о наименовании единицы частоты. . . . .	115

## INDEX DES RÉSUMÉS

	Pages
F. N. Nicolaeff. La théorie des erreurs des potentiomètres. . . . .	31
A. A. Tchetchouline. Sur la possibilité de l'emploi d'un tube à trois électrodes pour la mesure de la tension avec une précision élevée. . . . .	45
A. A. Tchetchouline. La mesure des résistances réactives à l'aide d'un voltmètre à tubes et d'un potentiomètre à courant continu. . . . .	57
A. A. Pavlova. Méthodes employées pour l'essai des potentiomètres au laboratoire du courant continu de L. I. M. S. . . . .	80
G. A. Kjandsky. La mesure de la longueur d'onde dans le diapason des ondes ultra-courtes. . . . .	92
A. I. Marenina. Les bobines de résistance-étalons. . . . .	95
E. S. Tchuraeva. L'influence des courts-circuits sur la force électromotrice. . . . .	103
S. V. Gorbachevitch. Les diviseurs de haute tension. . . . .	117
M. F. Malikov. Sur la dénomination de l'unité de fréquence. . . . .	122

