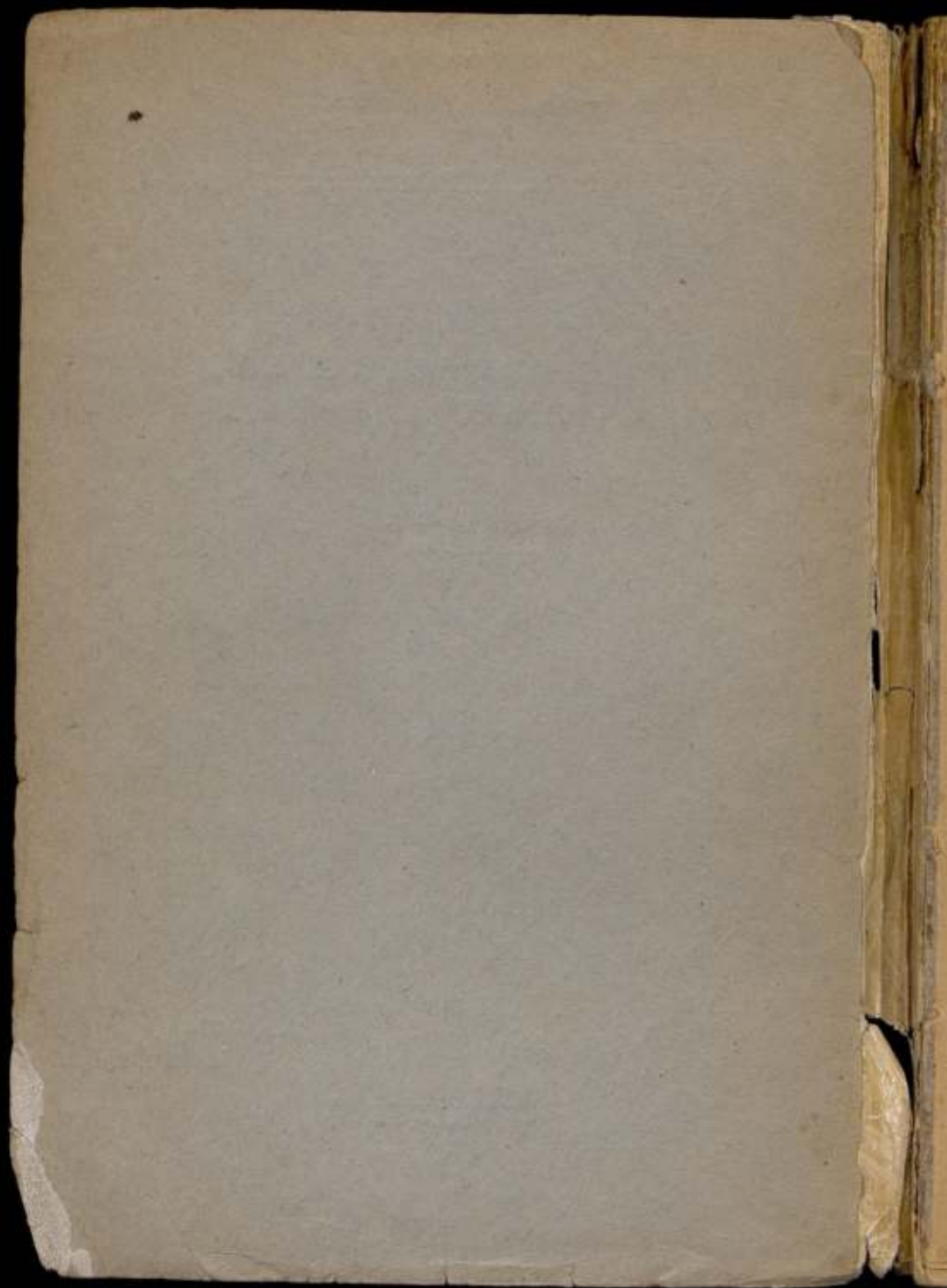


КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 1 (36)

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД — 1947



КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ВЫПУСК 1 (56)

Под редакцией
проф. *Н. А. Маренина*

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД—1967

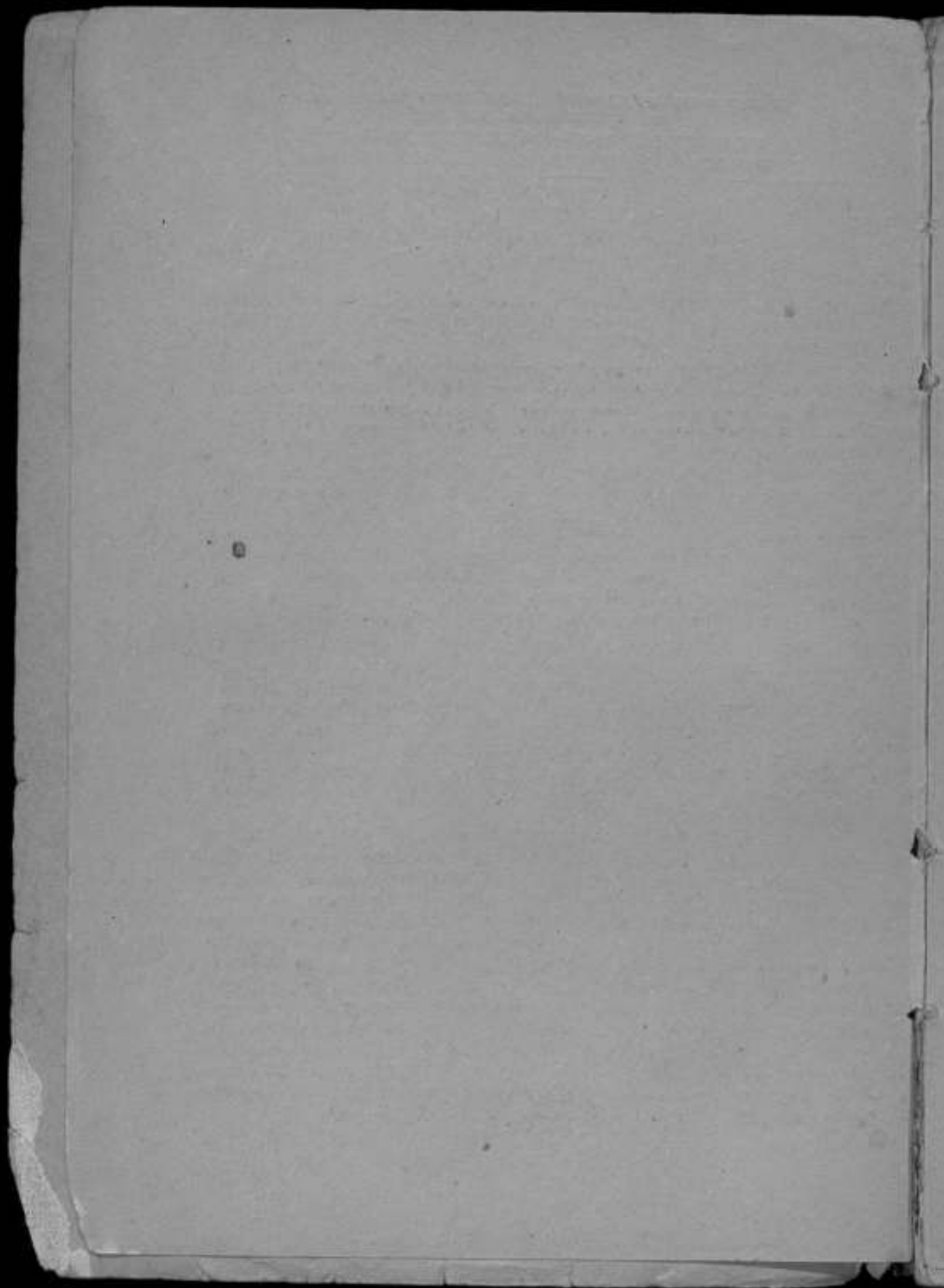


СХЕМА СЛИЧЕНИЙ ЭТАЛОННЫХ КАТУШЕК СОПРОТИВЛЕНИЯ

В 1935 г. Международное бюро мер и весов произвело взаимное сличение эталонных проволочных катушек сопротивления шести крупнейших метрологических лабораторий (Национальной физической лаборатории Англии, Бюро стандартов США, Физико-технического института Германии, Центральной электрической лаборатории Франции, Электротехнической лаборатории Токио и Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии), в результате чего был установлен средний международный ом. С этого момента Международное бюро мер и весов стало осуществлять контроль над значением международного ома.

Таким образом, в настоящее время ртутные эталоны сопротивления потеряли значение первичных эталонов и национальные метрологические лаборатории пользуются для материального воспроизведения единицы электрического сопротивления одноомными катушками сопротивления, которые периодически сличаются в Международном бюро мер и весов с такими же катушками других государств. В частности, в СССР имеется групповой эталон, определяющий единицу электрического сопротивления. Он состоит из четырёх одноомных катушек, а именно № 6 и № 8 (изготовленных заводом „Эталон“) и М4044 и М4046 (изготовленных фирмой О. Вольф в Берлине). Из них две первые катушки участвовали в международных сличениях 1935, 1937 и 1939 гг.

Итак, с помощью группового эталона сопротивления в настоящее время в СССР поддерживается и хранится средний международный ом.

Аналогичную роль имеющиеся эталонные катушки будут играть и после перехода на абсолютные электрические единицы с той только разницей, что все катушки, получив каждая специальную поправку, будут выражены в абсолютных омах и будут служить для поддержания и хранения в СССР абсолютного ома.

Для доведения значения среднего международного ома до рабочих мер, обращающихся в различных отраслях народного хозяйства, и для обеспечения взаимной согласованности электрических измерений в СССР, во ВНИИМ установлен набор рабочих эталонов электрического сопротивления с номинальными значениями в 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000; 10000 и 100000 Ω , причём для каждого из этих значений имеется своя группа катушек сопротивления. В дальнейшем предполагено установить также групповые эталоны сопротивления номинальных значений в 0,001 и 0,0001 Ω .

Таблица 1

План проведения измерений при установлении эталонов сопротивления значення от 0,01 до 10000 Ω

Номинальное значение группировки	Количество катушек в группе	ММ катушек	Есломогательные катушки	Катушки, служащие эталонами на отдельных этапах измерений	Этапы измерений	
					3	6
1	4	6, 8	—	Катушки ММ 6 и 8 сливаются периодически с эталонными катушками других государств в Международном Бюро мер и весов	6 и 8	Взаимные сравнения всех катушек группового эталона
1	12	4042, 4043, 4045, 7095, 49, 50, 9, 5, 10, 11, 12, 13	—	М4044, М4046	М4044 и М4046	Сравнение М4044 и М4046 между собой Сравнение всех катушек в 12 с М4044 и М4046 Сравнение М4044 и М4046 между собой

Р А Б О Ч И Е Г Р У П П Ы

10	5	6701, 6705, 6702, 7032, 7033	—	М4044 и М4046	—	<p>I. Взаимные сравнения эталонов в 10 Ω</p> <p>II. Эталонирование декадной катушки:</p> <p>а) Сравнения всех секций декадной катушки № 90 с эталонами в 1 Ω и сравнение 2 эталонов в 1 Ω между собой;</p> <p>б) Контрольные сравнения секций попарно между собой и двух половин декадной катушки между собой.</p> <p>III. Сравнения пяти катушек в 10 Ω группового эталона с суммой 10 секций декадной катушки № 90 не менее 2 раз.</p> <p>IV. Взаимные сравнения эталонов в 10 Ω</p>
100	4	7039, 7040, 1504, 39	—	Сумма 10 секций декадной катушки № 90	2 катушки по 10 Ω из группового эталона	<p>I. Взаимные сравнения эталонов в 100 Ω</p> <p>II. Эталонирование декадной катушки:</p> <p>а) сравнения 10 секций декадной катушки № 91 с двумя эталонами в 10 Ω и сравнение эталонов в 10 Ω между собой</p> <p>б) контрольные сравнения секций попарно между собой и двух половин декадной катушки друг с другом</p> <p>III. Сравнения 4 катушек в 100 Ω группового эталона с суммой 10 секций декадной катушки № 91 (не менее 2 раз)</p> <p>IV. Взаимные сравнения эталонов в 100 Ω</p>

1	2	3	4	5	6
1000	4	7044, 7045, 6506, 502	Интерполяцион- ная № 1506	2 катушки по 100 Ω 2 катушки по 10 Ω 2 катушки по 100 Ω	<p>I. Взаимные сравнения эталонов в 1000 Ω</p> <p>II. Установление отношения секций переходной катушки № 89:</p> <p>а) сравнения секции 100 Ω с 2 эталонами в 100 Ω из группового эталона и проверка последних</p> <p>б) сравнения секций в 10 Ω с двумя эталонами по 10 Ω из группового эталона и проверка последних</p> <p>III. Сравнения катушек в 1000 Ω с 2 эталонами по 100 Ω</p> <p>IV. Взаимные сравнения катушек в 1000 Ω</p>
10000	3	7051, 7052, 277	Интерполяцион- ная № 1506 Переходная № 89 Интерполяцион- ная № 1506	2 катушки по 1000 Ω	<p>I. Взаимные сравнения катушек в 10000 Ω</p> <p>II. Сравнения катушек в 10 000 Ω с 2 эталонами по 1000 Ω</p> <p>III. Взаимные сравнения катушек в 10 000 Ω</p>
100000	3	6943, 6944, 267	Интерполяцион- ная № 1506 1 катушка в 100 Ω и 1 катушка в 1000 Ω Интерполяцион- ная № 1506	2 катушки по 10000 Ω	<p>I. Взаимные сравнения катушек в 100 000 Ω</p> <p>II. Сравнения катушек в 100 000 Ω с 2 эталонами по 10000 Ω</p> <p>III. Взаимные сравнения катушек в 100 000 Ω</p>

0,1	5	6785, 6786, 6898, 7097, 7098	—	М4044 и М4046 2 секции декадной катушки № 92	<p>I. Взаимные сравнения катушек в 0,1 Ω</p> <p>II. Эталонирование декадной катушки № 92:</p> <p>а) сравнение суммы 10 секций декадной катушки с 2 катушками основного эталона и проверка последних</p> <p>б) сравнения 2 половин декадной катушки между собой не менее 2 раз;</p> <p>в) сравнение каждой секции 1-й половины декадной катушки с одной из секций 2-й половины и каждой секции второй половины с одной из секций 1-й половины</p> <p>г) контрольные сравнения секций попарно между собой</p> <p>III. Сравнения эталонных катушек в 0,1 Ω с 2 произвольно выбранными секциями декадной катушки № 92 и контрольное сравнение последних.</p> <p>IV. Взаимные сравнения катушек в 0,1 Ω</p>
0,01	4	7017, 7018, 6889, 455	—	2 катушки в 0,1 Ω 2 секции декадной катушки № 93	<p>I. Взаимные сравнения катушек в 0,1 Ω</p> <p>II. Эталонирование декадной катушки № 93:</p> <p>а) сравнение суммы 10 секций декадной катушки № 93 с двумя катушками группового эталона в 0,1 Ω и проверка последних;</p> <p>б) сравнения 2 половин декадной катушки между собой (не менее 2 раз);</p> <p>в) сравнения каждой секции 1-й половины с одной из секций 2-й половины и каждой секции 2-й половины с одной из секций 1-й половины;</p> <p>г) контрольные сравнения секций попарно между собой</p> <p>III. Сравнения эталонных катушек в 0,01 Ω с 2 произвольно выбранными секциями декадной катушки № 93 и контрольное сравнение последних между собой</p> <p>IV. Взаимные сравнения катушек в 0,01 Ω</p>

Существенной предпосылкой рационального ведения каждого эталонного хозяйства является непрерывная работа по изучению состояния всех имеющихся эталонов. Поэтому, приступая в 1930 г. к установлению упомянутого выше комплекса рабочих эталонных катушек сопротивления, Эталонная электрическая лаборатория прежде всего разработала методику эталонирования катушек, т. е. определения точных значений сопротивления каждой эталонной катушки. В основном, эта работа по плану лаборатории состоит из:

а) определения сопротивления каждой из одноименных катушек, входящих в основной групповой эталон;

б) установления значений сопротивления всех остальных катушек, образующих групповые рабочие эталоны электрического

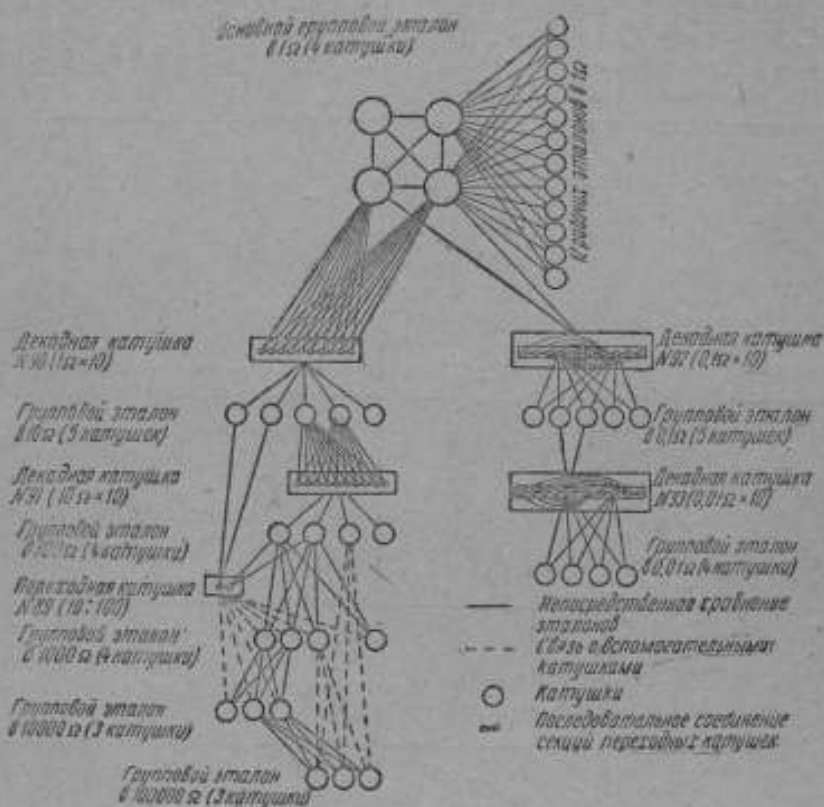


Рис. 1. Схема № 1 перехода от 1 Ω до 100 000 Ω вверх и до 0,01 Ω вниз.

сопротивления, путём последовательного перехода от одноименных катушек через все промежуточные значения вверх до 100 000 и вниз до 0,01 Ω.

В дальнейшем изложении приводится схема перехода № 1 (рис. 1) и план измерений (табл. 1), по которым Лаборатория электрических мер проводила установление полного набора сначала отдельных катушек сопротивления, а затем и групповых эталонов.

При составлении схемы и плана были учтены следующие положения:

1. В отчетах Международного комитета мер и весов за 1935 и 1937 гг., а также в не опубликованных пока материалах о работе сессии 1939 г. Консультативного комитета по электричеству имеются данные о динамике изменений значений сопротивления эталонных катушек, участвовавших в международных сличениях за период 1935—1939 гг. Эти данные сведены в табл. 2, содержащую отклонения значений национальных эталонов международного ома от среднего международного ома.

Таблица 2

Страна	Март 1935 г.	Декабрь 1939 г.	Начало 1939 г.
Германия	$\pm 9,8 \cdot 10^{-6}$	$\pm 6,5 \cdot 10^{-6}$	$\pm 9,1 \cdot 10^{-6}$
США	$-5,5 \cdot 10^{-6}$	$-3,7 \cdot 10^{-6}$	$-3,1 \cdot 10^{-6}$
Великобритания	$-3,5 \cdot 10^{-6}$	$-3,9 \cdot 10^{-6}$	$-6,5 \cdot 10^{-6}$
Япония	$-11,2 \cdot 10^{-6}$	$-10,0 \cdot 10^{-6}$	$-14,4 \cdot 10^{-6}$
СССР	$\pm 6,0$	$\pm 0,4 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$
Франция	$\pm 6,0$	$\pm 0,9 \cdot 10^{-6}$	$\pm 3,7 \cdot 10^{-6}$

Цифры таблицы для СССР показывают, что катушки основного группового эталона в 1-Ω, в общем, хорошо сохраняют постоянство своих значений, а именно единица сопротивления в СССР изменилась за 4 года на $0,8 \cdot 10^{-6}$ Ω, что составляет за год всего 2 десятиллионных доли ома.

Это дает право, впредь до нового международного сличения, пользоваться средним значением основного группового эталона для установления всей шкалы рабочих эталонов сопротивления.

Для характеристики постоянства основного эталона на рис. 2 приводятся также диаграммы изменений значений катушек № 6, № 8, М4044 и М4046 за 12 лет.

2. Установление всех групповых эталонов производится при помощи переходных сопротивлений, которыми являются катушки 2 типов, изготовленные бывшими мастерскими Главной палаты мер и весов по проекту Эталонной электрической лаборатории.

Первый тип переходных катушек, применимый для эталонирования катушек от 0,01 до 100 Ω, представляет собой десять последовательно соединенных марганциновых секций, сопротивле-

¹ Центральная метрологическая лаборатория Франции, а затем и Всесоюзный институт метрологии согласился в 1957 г. по предложению Международного комитета мер и весов испробовать различные сопротивления своих эталонных катушек, приняв это значение к среднему международному ому. Остальные метрологические лаборатории этого постановления не выполняли.

ния которых берутся одинаковыми по номинальному значению. Начало первой и конец десятой секции подведены к токовым дугам с потенциальными зажимами, которые позволяют ввести в цепь сумму 10 секций. У всех промежуточных секций конец одной и начало соседней также подведены к потенциальным столбикам с зажимами. Таким образом, двумя соседними столбиками можно ввести в цепь каждую секцию в отдельности. По-

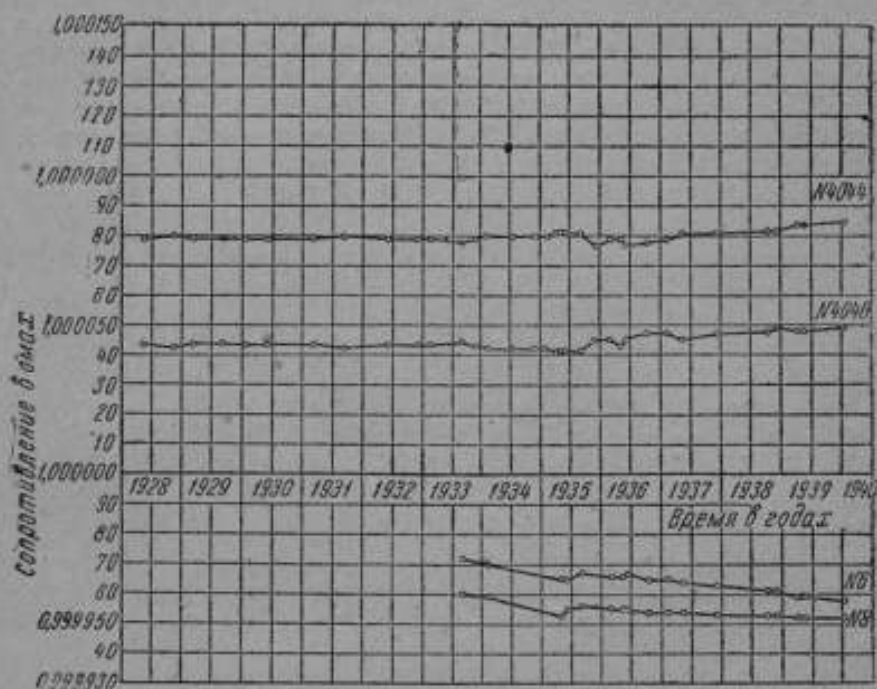


Рис. 2. Эталонные катушки в 1 Ом (основной эталон)

дробно конструкция и эталонирование этих катушек описаны в статье М. Ф. Маликова и Е. К. Вессо-Адо [1].

Для установления эталонов выше 100 Ом применяются переходные катушки, состоящие из двух последовательно соединенных секций, одна из которых имеет сопротивление в 10 раз больше, чем другая. Начало первой и конец второй секции выведены к токовым дугам с потенциальными зажимами, позволяющими включать всю катушку в цепь; конец первой и начало второй секций присоединены к общему потенциальному столбику.

Из двух (имеющихся в лаборатории) таких катушек, для перехода к эталонам выше 100 Ом, применялась одна катушка № 89 с секциями в 10 и 100 Ом, которая играла роль двух плеч

мостика Витстова с отношением 1:10. Определение температурных формул для всех переходных катушек было произведено перед первым эталонированием в 1930 г.

3. Работа по установлению значения каждой группы от 0,01 до 100 Ω производилась по четырём этапам схемы, выработанной практикой лаборатории:

I этап. Взаимные сравнения катушек, входящих в групповой эталон.

II этап. Эталонирование переходной катушки.

III этап. Сравнение катушек, входящих в групповой эталон, с переходной катушкой (частью её или целой в зависимости от значения измеряемых эталонов).

IV этап. Повторные взаимные сравнения катушек, входящих в групповой эталон.

Схема построена так, что каждый случайный промах или ошибка измерений и вычислений выявляется при ближайшем контроле. Незамеченными могут пройти только ошибки II этапа, результаты которого другими этапами не контролируются. Однако в этот этап введены дополнительные контрольные сравнения секций попарно между собой, так как результаты II этапа являются исходными данными при установлении эталонов.

Все измерения производились компенсационным методом, схема и описание которого даны в статье М. Ф. Маликова [2], с интерполяцией нулевого отклонения гальванометра присоединением двух различных шунтов к большей катушке. Для эталонных катушек применялись следующие формулы:

$$X = N - \frac{N^2}{R_1} - \frac{d_1}{d_1 - d_2} N^2 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (1)$$

если $X < N$

и

$$X = N + \frac{X^2}{R_1} + \frac{d_1}{d_1 - d_2} X^2 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (2)$$

если $X > N$,

причём здесь: X — сопротивление измеряемой катушки;

N — сопротивление эталонной катушки;

d_1 и d_2 — показания гальванометра при двух шунтах R_1 и R_2 .

Более точными формулами (приведенными в упомянутой статье М. Ф. Маликова) почти не приходилось пользоваться вследствие малой разницы между значениями сопротивлений катушек.

4. Установление групповых эталонов, больших 100 Ω , производилось по методу моста Витстова и состояло из тех же 4 этапов, причём III этап был несколько видоизменён. Однако при измерениях II этапа применялся компенсационный метод. Для

избежании двукратной перестройки измерительной схемы этот этап чаще всего производился первым.

Измерения I и IV этапов производились по методу моста Витстона с отношением плеч 1:1. Сравнимые катушки являлись двумя ветвями моста, две другие ветви составляла интерполяционная катушка № 1506 (фирмы О. Вольф) с секциями 100 и 100 Ω , соединёнными последовательно через интерполяционное сопротивление 0,1 Ω . Вводя поочередно интерполяционное сопротивление то в одно, то в другое плечо моста, мы получаем в первом случае отношение этих плеч $1 \pm 0,001$, а во втором $1 - 0,001$. Благодаря этому, при постоянном отношении двух других плеч моста (сравнимые катушки), отклонения гальванометра получаются, как правило, разных знаков, что позволяет найти значение испытуемого сопротивления путём интерполяции.

Для исключения неравенства сопротивлений секций интерполяционной катушки измерения повторялись при взаимном перемещении плеч интерполяционной катушки в схеме моста. При этих измерениях применялась формула:

$$X = N + N\delta \frac{1}{2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 - d_2} + \frac{d_1' + d_2'}{d_1' - d_2'} \right), \quad (3)$$

где X и N — сравниваемые катушки;

d_1 и d_2 — отклонения зеркала гальванометра по шкале при двух различных отношениях плеч катушки № 1506, получаемых переключением интерполяционного сопротивления от одного плеча интерполяционной катушки к другому;

d_1' и d_2' — аналогичные отклонения, но при измерениях с взаимным переключением плеч интерполяционной катушки;

δ — отношение интерполяционного сопротивления к плечу интерполяционной катушки $\left(\frac{0,1}{100} \right)$, определённое ранее (одновременно с отношением её плеч).

Измерения III этапа производились методом моста Витстона в отношении 1:10. Секции переходной катушки № 89 являлись двумя ветвями моста; две другие ветви составлялись из эталонируемой катушки X и одного из двух уже установленных эталонов ближайшего низшего порядка. Равновесие моста достигалось либо шунтированием секции в 100 Ω переходной катушки

в случае, если $\frac{X}{N}$ оказывалось $< \left[\frac{100}{10} \right]$, либо секции в 10 Ω , если

$$\frac{X}{N} > \left[\frac{100}{10} \right].$$

Для интерполяции нулевого отклонения гальванометра брались различные шунты, от присоединения которых показания гальванометра получались разных знаков. Интерполяционные

формулы, выведенные для таких измерений М. Ф. Маликовым, имели вид:

$$\frac{X}{N} = \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \cdot \left[1 - \frac{V_1}{R_1} - V_2 \frac{d_1}{d_1 - d_2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right], \quad (4)$$

если $\frac{X}{N} < \frac{U_2}{U_1}$,

$$\frac{X}{N} = \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \cdot \left[1 + \frac{V_2}{R_1} + V_2 \frac{d_1}{d_1 - d_2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right], \quad (5)$$

если $\frac{X}{N} > \frac{U_1}{U_2}$,

где $\frac{V_1}{V_2}$ — отношение плеч переходной катушки, а остальные обозначения те же, что в формулах (1) и (2).

Определение плеч переходной катушки № 89 для эталонирования 10 000 Ω чаще всего заново не производилось, так как за маленький промежуток времени между эталонированиями 1000 и 10 000 Ω изменения её были незаметны. При эталонировании 100 000 Ω , для получения нужной чувствительности, приходилось повышать напряжение аккумуляторной батареи, отчего катушка № 89 сильно грелась. Поэтому, вместо двух плеч катушки № 89, обычно пользовались эталонными катушками в 100 и 1000 Ω .

5. Измерения всех значений, за исключением 0,01 и 100 000 Ω , производились с очень высокой точностью. Вероятная погрешность результата не превосходила 0,0002%, а для катушек в 1 и 10 Ω погрешность была значительно меньше.

При измерениях катушек в 0,01 Ω компенсационным методом погрешности получались порядка 0,001—0,002%, что объясняется трудностью обеспечить стабильность напряжения у источника питания.

Ошибки измерения катушек в 100 000 Ω не превышали 0,0005%.

Полный процесс эталонирования представлен схемой № 2 (рис. 3).

КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ

В применявшейся схеме установления значения группового эталона, состоящей из четырёх этапов, самыми ответственными из них, действительно устанавливающими значения эталонных катушек, являются II и III этапы, т. е. установление переходного эталона и сравнение с ним изучаемых катушек группового эталона.

Измерения I и IV этапов являются контрольными и имеют целью выяснить, не изменились ли сопротивления катушек в процессе эталонирования. Однако, если результаты измерения I и IV этапов для одной и той же катушки разнятся между собой, то для констатирования, что катушка действительно изменилась, надо иметь уверенность, что в измерениях нет ошибки.

Кроме того, необходимо учитывать следующее. В III этап устанавливается среднее значение группового эталона. Подставив его в уравнения I и IV этапов, получаем для каждой катушки три значения: 1) определенное в I этапе из взаимных сравнений; 2) определенное в III этапе сравнением с переходным эталоном; 3) определенное в IV этапе из взаимных сравнений.

Сходимость всех трёх результатов является необходимой, но еще недостаточной гарантией установления точных значений сопротивлений катушек. Действительно, все три значения имеют общую исходную величину — значение переходного эталона. Но так как погрешность последнего не исключена (тем более, что до сего времени переходные катушки были менее устойчивыми, чем остальные эталоны), то эта ошибка может войти во все три значения испытываемой катушки, не дав никаких расхождений между ними. Такой именно случай произошел в апреле 1940 г. при установлении эталонов в $0,01 \Omega$.

Отсюда следует, что в пределах эталонирования одного значения группы, при очень высокой точности измерений, точность установления значения группового эталона может быть намного ниже, в зависимости от поведения катушек, участвующих в процессе эталонирования катушек данного значения.

Для исчерпывающей проверки измерения, т. е. чтобы не пропустить ошибки и оценить точность установления значения группового эталона, в последнее время определилась система контроля всего процесса эталонирования, частично применявшаяся уже давно, а полностью — при эталонировании $0,01 \Omega$. Применение такого контроля, во-первых, позволяет, в случае неизменяемости изучаемых эталонов в течение процесса эталонирования, отказать от IV этапа измерений, что можно приветствовать, имея в виду большое количество измерений при установлении эталонов от $0,01$ до 100Ω . Во-вторых, так как контроль следует непосредственно за выполнением каждого этапа измерений, то, в случае какого-нибудь несовпадения, сразу определяются те измерения, которые можно взять под сомнение, а следовательно, получается возможность устранения причины расхождений измерений.

Принципиально схема установления точных значений катушек группового эталона одинакова для всех значений от $0,01$ до $100\,000 \Omega$. Но так как в построении плана измерений имеются некоторые особенности для различных значений эталонов, то соответственно бывает различно и построение схем контроля. В виде примеров приводятся ниже три формы построения контрольных операций.

А. Установление групповых эталонов от 1 до 100Ω

Рассмотрим случай эталонирования группового эталона в 10Ω , причём для простоты будем считать его состоящим из трёх катушек.

Введём обозначения, остающиеся одинаковыми для всех групп. Изучаемые катушки в 10Ω — A , B и C . Два эталона ближайшего низшего порядка (в данном случае 1Ω) — N_1 и N_2 .

Среднее значение группового эталона в 10Ω :

$$M = \frac{|A| + |B| + |C|}{3}$$

Секции декадной катушки — 1, 2, 3, 4 10. Общее сопротивление ее $\left| \sum_{n=1}^{10} n \right|$

Эталонирование

Контроль

Измерения I этапа

Взаимные сравнения катушек:

Решая уравнения попарно, получаем:

1. $|A| - |B| = a_1$
2. $|A| - |C| = a_2$
3. $|B| - |C| = a_3$

- из (2) и (3): $|A| - |B| = a_2 - a_3$
из (1) и (3): $|A| - |C| = a_1 + a_3$
из (1) и (2): $|B| - |C| = a_1 - a_2$

Если в пределах ожидаемой точности измерений

$$a_1 = a_2 - a_3, \quad a_2 = a_1 + a_3, \quad a_3 = a_2 - a_1,$$

то ошибки в измерениях нет.

В результате

$$|A| = M + d_1; \quad |B| = M + d_2; \quad |C| = M + d_3,$$

где d_1 , d_2 и d_3 — отклонения значений катушек от среднего значения группового эталона.

Измерения II этапа

1-й контроль

Эталонирование декадной катушки.

Исключая из каждой пары уравнений секции 1, 2, 3... 10, получаем:

Сравнение секции с катушками предыдущего значения.

1. $\left. \begin{array}{l} |1| - |N_1| = b_1 \\ |1| - |N_2| = b_2 \end{array} \right\}$ из (1) и (2): $|N_1| - |N_2| = b_2 - b_1$
2. $\left. \begin{array}{l} |2| - |N_1| = b_3 \\ |2| - |N_2| = b_4 \end{array} \right\}$ из (3) и (4): $|N_1| - |N_2| = b_4 - b_3$

.
.

19. $\left. \begin{array}{l} |10| - |N_1| = b_{19} \\ |10| - |N_2| = b_{20} \end{array} \right\}$ из (19) и (20): $|N_1| - |N_2| = b_{20} - b_{19}$

Кроме того, непосредственным сравнением получим:

$$21. |N_1| - |N_2| = b_{21}$$

В то же время при эталонирования группы катушек предыдущего значения было получено:

$$|N_1| - |N_2| = b_0$$

Решая уравнения (1—20) относительно |1|, |2|, |3|... |10|, получим:

$$|1| = \frac{|N_1 + N_2|}{2} + \frac{b_1 + b_2}{2},$$

$$|2| = \frac{|N_1 + N_2|}{2} + \frac{b_2 + b_4}{2},$$

$$\dots$$

$$|10| = \frac{|N_1 + N_2|}{2} + \frac{b_{10} + b_{20}}{2}.$$

В результате определяем $\left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = |1| + |2| + |3| + \dots + |10|.$

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

Измерения

Сравнения секций декадной катушки попарно между собой:

$$1. |1 + 2| - |3 + 4| = c_1$$

$$2. |3 + 4| - |5 + 6| = c_2$$

$$3. |5 + 6| - |7 + 8| = c_3$$

$$4. |7 + 8| - |9 + 10| = c_4$$

$$5. |9 + 10| - |1 + 2| = c_5$$

Проверка

Из приведенных ранее уравнений (1—20) получаем:

$$c_1 = \frac{1}{2}(b_1 + b_2 + b_3 + b_4 - b_5 - b_6 - b_7 - b_8)$$

$$c_2 = \frac{1}{2}(b_5 + b_6 + b_7 + b_8 - b_9 - b_{10} - b_{11} - b_{12})$$

$$c_3 = \frac{1}{2}(b_9 + b_{10} + b_{11} + b_{12} - b_{13} - b_{14} - b_{15} - b_{16})$$

$$c_4 = \frac{1}{2}(b_{13} + b_{14} + b_{15} + b_{16} - b_{17} - b_{18} - b_{19} - b_{20})$$

$$c_5 = \frac{1}{2}(b_{17} + b_{18} + b_{19} + b_{20} - b_1 - b_2 - b_3 - b_4)$$

¹ Формальные, так как практика показывает, что два эталона, идентичные по своему изготовлению, могут изменяться одинаково, причём разности между их значениями остается постоянной.

Сравнением одной половины декадной катушки с другой получаем:

$$6. \left| \sum_{n=1}^6 n \right| - \left| \sum_{n=6}^{10} n \right| = c_0,$$

Кроме того, имеем:

$$c_0' = \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^{10} b_n - \sum_{n=11}^{20} b_n \right).$$

Если в пределах точности результаты измерений совпадают с результатами проверки, то можно считать правильными измерения II этапа.

Равным образом можно считать неизменившимися значения секций и их суммы после определения их величин.

Надо отметить, что I-й контроль является достаточно исчерпывающим для II этапа, так что дополнительного, т. е. сравнения секций попарно, нет надобности производить. Его лучше сделать после измерений III этапа.

Измерения III этапа

Сравнения катушек A, B и C с суммой секций декадной катушки:

$$1. |A| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = e_1,$$

$$2. |B| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = e_2,$$

$$3. |C| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = e_3,$$

В обратном порядке и (по возможности) с другими шунтами:

$$4. |C| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = e_4,$$

$$5. |B| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = e_5,$$

$$6. |A| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = e_6.$$

Контроль

Если в пределах ожидаемой точности измерений

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= e_6, \\ e_2 &= e_5, \\ e_3 &= e_4, \end{aligned} \right\} \quad (III)$$

то измерения пока можно считать произведёнными правильно.

Пусть

$$\frac{e_1 + e_6}{2} = f_1; \quad \frac{e_2 + e_5}{2} = f_2; \quad \frac{e_3 + e_4}{2} = f_3.$$

В таком случае получаем
путем вычислений:

$$7. |A| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = f_1$$

$$8. |B| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = f_2$$

$$9. |C| - \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = f_3$$

Исключая $\left| \sum_{n=1}^{10} n \right|$ из уравне-

ний (7—9), получаем:

$$\text{из (7) и (8): } |A| - |B| = f_1 - f_2$$

$$\text{из (7) и (9): } |A| - |C| = f_1 - f_3$$

$$\text{из (8) и (9): } |B| - |C| = f_2 - f_3$$

Полученные разности сопоставляем с результатами измерений I этапа.

$$\text{Если } \begin{aligned} f_1 - f_2 &= a_{12}, \\ f_1 - f_3 &= a_{13}, \\ f_2 - f_3 &= a_{23} \end{aligned}$$

то мы можем считать, что катушки A , B и C не изменились.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, из уравнений III этапа определяются окончательно значения катушек A , B и C и среднее значение группового эталона M .

Если разности (по данным измерения III этапа)

$$\begin{aligned} |A| - |B|, \\ |A| - |C|, \\ |B| - |C| \end{aligned}$$

совпадают с аналогичными разностями I этапа, то это свидетельствует о неизменности катушек A , B и C за время их установления, но не говорит ничего о правильности и точности полученных из уравнений (7—9) значений A , B и C . Следует отметить,

что неизменность $\left| \sum_{n=1}^{10} n \right|$ после её определения осталась непроверенной.

Так как эта сумма является исходной величиной для значений A , B и C и её возможные быстрые изменения могут не отразиться на значениях разностей между A , B и C , то правильность и точность установления значений A , B и C остаётся также непроверенной. Поэтому полезно вставить именно сюда выполнение измерений секций декадной катушки попарно между собой (дополнительный контроль II этапа).

Получение результатов, изложенных при описании этой части работы, решает вопрос об установлении значения группового

эталона, а все контрольные операции трёх этапов служат гарантией отсутствия ошибок измерений. В таком случае надобность в IV этапе измерений отпадает.

Если указанные разности

$$|A| - |B|, |A| - |C|, |B| - |C|$$

не совпадают с аналогичными разностями I этапа, то это может являться следствием изменения сопротивлений самих катушек A , B и C , а также наличия какой-либо систематической ошибки в первых шести измерениях III этапа, которую не выявляет контроль этих измерений. Для определения причины несовпадения надо произвести измерения IV этапа.

Измерения IV этапа

Взаимные сравнения катушек:

1. $|A| - |B| = a'_1$
2. $|A| - |C| = a'_2$
3. $|B| - |C| = a'_3$

Контроль

Решая уравнения, получаем:

$$\text{из (2) и (3): } |A| - |B| = a'_2 - a'_3,$$

$$\text{из (1) и (3): } |A| - |C| = a'_1 + a'_3,$$

$$\text{из (1) и (2): } |B| - |C| = a'_2 - a'_1.$$

Если в пределах точности измерений

$$a'_1 = a'_2 - a'_3; \quad a'_2 = a'_1 + a'_3;$$

$a'_3 = a'_2 - a'_1$, то ошибок в измерениях нет.

В результате

$$|A| = M + d'_1; \quad |B| = M + d'_2;$$

$$|C| = M + d'_3,$$

где d'_1 , d'_2 и d'_3 — отклонения значений катушек от среднего значения группового эталона.

Если в пределах точности измерений $d_1 = d'_1$; $d_2 = d'_2$; $d_3 = d'_3$, то следует считать, что катушки A , B и C за время эталонирования не изменились; искать ошибку надо в 1—6 измерениях III этапа.

В противном случае разности

$$d_1 - d'_1; \quad d_2 - d'_2; \quad d_3 - d'_3$$

дают величины изменений катушек, которые должны подтвердиться сопоставлением трёх рядов разностей:

$$|A| - |B|; \quad |A| - |C|; \quad |B| - |C|,$$

полученных в I, III и IV этапах измерений.

Б. Установление групповых эталонов от 1 до 0,01 Ω

Для простоты групповой эталон состоит из трех катушек А, В и С.

Два эталона ближайшего высшего порядка — N_1 и N_2 .

Секции декадной катушки, служащие эталонами для изучаемых катушек, — n_1 и n_2 .

Эталонирование Измерения I этапа

Взаимные сравнения катушек группового эталона

Схема измерений та же, что и в I этапе раздела А.

Измерения II этапа

Эталонирование декадной катушки:

а) Сравнения суммы секций декадной катушки с 2 эталонами предыдущего высшего значения и проверка последних.

$$1. \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| - |N_1| = b'_1$$

$$2. \left| \sum_{n=1}^{10} n \right| - |N_2| = b'_2$$

$$3. |N_1| - |N_2| = b'_3$$

Из первых двух уравнений определяем:

$$\left| \sum_{n=1}^{10} n \right| = \frac{|N_1| + |N_2|}{2} +$$

$$+ \frac{b'_1 + b'_2}{2} = R$$

или

$$\left| \sum_{n=1}^5 n \right| + \left| \sum_{n=6}^{10} n \right| = R \quad (1)$$

Контроль

Осуществляется тот же контроль, что и для эталонов от 1 до 100 Ω .

Контроль измерений п. (а).
Исключая из первых двух уравнений п. (а) $\left| \sum_{n=1}^{10} n \right|$, получаем:
 $|N_1| - |N_2| = b'_2 - b'_1$.

Ранее при эталонировании катушек предыдущего значения было получено:

$$|N_1| - |N_2| = b'_0$$

Если $b'_2 - b'_1 = b'_3 = b'_0$, то в измерениях п. (а) ошибок нет,

и значение $\left| \sum_{n=1}^{10} n \right|$ определено правильно.

б) Сравнение двух половин декадной катушки между собой:

$$4. \left| \sum_{n=1}^5 n \right| - \left| \sum_{n=6}^{10} n \right| = r.$$

Решая последнее уравнение совместно с (1), получаем:

$$\left| \sum_{n=1}^5 n \right| = \frac{R+r}{2} \quad \text{и} \quad \left| \sum_{n=6}^{10} n \right| = \frac{R-r}{2}$$

в) Сравнения каждой секции 1-й половины декадной катушки с одной из секций $|x_n''|$ 2-й половины и каждой секции 2-й половины с одной из секций $|x_n'|$ 1-й половины:

$$\left. \begin{array}{l} 5. \quad |1| - |x_n''| = b_1 \\ 6. \quad |2| - |x_n''| = b_2 \\ 7. \quad |3| - |x_n''| = b_3 \\ 8. \quad |4| - |x_n''| = b_4 \\ 9. \quad |5| - |x_n''| = b_5 \\ 10. \quad |6| - |x_n''| = b_6 \\ 11. \quad |7| - |x_n'| = b_7 \\ 12. \quad |8| - |x_n'| = b_8 \\ 13. \quad |9| - |x_n'| = b_9 \\ 14. \quad |10| - |x_n'| = b_{10} \end{array} \right\} (2)$$

Объединив уравнения (5—9) и (10—14) в 2 группы и решая обе группы по столбцам, получаем:

$$5 |x_n''| = \frac{R+r}{2} - \sum_{n=1}^5 b_{n1}$$

$$5 |x_n'| = \frac{R-r}{2} - \sum_{n=6}^{10} b_{n1}$$

Контроль измерений пп. (б) и (в)

Измерения пп. (б) и (в) контролируются только сравнением секций попарно между собой. Этими контрольными измерениями, обязательными на данном этапе, получаем следующие разности:

$$|1+2| - |3+4| = c_1$$

$$|3+4| - |5+6| = c_2$$

$$|5+6| - |7+8| = c_3$$

$$|7+8| - |9+10| = c_4$$

$$|9+10| - |1+2| = c_5$$

Отсюда

$$|x_n^r| = \frac{R+r}{10} - \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 b_n = P$$

$$|x_n^l| = \frac{R-r}{10} - \frac{1}{5} \sum_{n=6}^{10} b_n = Q$$

После этого из уравнений [2] определяем:

$$\left. \begin{aligned} |1| &= P + b_1 = s_1 \\ |2| &= P + b_2 = s_2 \\ |3| &= P + b_3 = s_3 \\ |4| &= P + b_4 = s_4 \\ |5| &= P + b_5 = s_5 \\ |6| &= Q + b_6 = s_6 \\ |7| &= Q + b_7 = s_7 \\ |8| &= Q + b_8 = s_8 \\ |9| &= Q + b_9 = s_9 \\ |10| &= Q + b_{10} = s_{10} \end{aligned} \right\} (3)$$

Измерения III этапа

Сравнения катушек группового эталона А, В и С с 2 произвольно выбранными секциями 1, 2, 3, ..., 10 декадной катушки, которые обозначаем через n_1 и n_2 , и проверка последних:

$$\left. \begin{aligned} 1. & |A| - |n_1| = e_1 \\ 2. & |A| - |n_2| = e_2 \\ 3. & |B| - |n_1| = e_3 \\ 4. & |B| - |n_2| = e_4 \\ 5. & |C| - |n_1| = e_5 \\ 6. & |C| - |n_2| = e_6 \\ 7. & |n_1| - |n_2| = e_7 \end{aligned} \right\}$$

С другой стороны, находим соответственные разности вычислением из уравнений (3):

$$\left. \begin{aligned} s_1 + s_2 - s_3 - s_4 &= c_1 \\ s_3 + s_4 - s_5 - s_6 &= c_2 \\ s_5 + s_6 - s_7 - s_8 &= c_3 \\ s_7 + s_8 - s_9 - s_{10} &= c_4 \\ s_9 + s_{10} - s_1 - s_2 &= c_5 \end{aligned} \right\}$$

Если в пределах точности измерений

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= c_1' \\ c_2 &= c_2' \\ c_3 &= c_3' \\ c_4 &= c_4' \\ c_5 &= c_5' \end{aligned} \right\}$$

то значения секций декадной катушки установлены правильно.

1-й контроль

Исключая катушки А, В и С из каждой пары уравнений, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \text{из (1) и (2): } |n_1| - |n_2| &= e_2 - e_1 \\ \text{из (3) и (4): } |n_1| - |n_2| &= e_4 - e_3 \\ \text{из (5) и (6): } |n_1| - |n_2| &= e_6 - e_5 \end{aligned} \right\}$$

Если $e_2 - e_1 = e_4 - e_3 = e_6 - e_5 = e_7 = e_0$, то это свидетельствует:

- 1) об отсутствии ошибок в измерениях III этапа,
- 2) о неизменности секций n_1 и n_2 после их установления

Кроме того, из уравнений (3) можно получить:

$$|n_1| - |n_2| = e_0.$$

Решая уравнения (1—6) и обозначив $\frac{|n_1| + |n_2|}{2} = n$,

$$\frac{e_1 + e_2}{2} = f_1; \quad \frac{e_3 + e_4}{2} = f_2;$$

$$\frac{e_5 + e_6}{2} = f_3;$$

получаем:

$$8. |A| = n + f_1$$

$$9. |B| = n + f_2$$

$$10. |C| = n + f_3$$

В результате измерений III этапа определены значения катушек A , B и C , а также среднее значение группового эталона. При этом какие-либо ошибки и промахи измерительного характера исключаются применением данной системы контроля.

Однако, если $f_1 - f_2 \neq a_1$; $f_1 - f_3 \neq a_2$; $f_2 - f_3 \neq a_3$, то это будет свидетельствовать либо о наличии вычислительных ошибок при решении уравнений (8—10) или в операциях второго контроля, либо о каких-либо изменениях, происшедших в изучаемых катушках после I этапа. В таком случае измерения IV этапа могут раскрыть причину несовпадения результатов.

3. Установление групповых эталонов выше 100 Ω (1000 и 10 000 Ω)

Обозначения. Групповой эталон состоит из 3 изучаемых катушек A , B и C .

Два эталона ближайшего низшего порядка, применяемые для эталонирования катушек A , B и C — N_1 и N_2 .

Переходный эталон — катушка № 89 с секциями в 100 и 10 Ω . Их обозначения соответственно V_1 и V_2 . При эталонировании переходной катушки эталонами служат:

две катушки по 100 Ω n_1 и n_2
 две катушки по 10 Ω n_3 и n_4

*Эталонирование
Измерения I этапа*

Взаимные сравнения катушек, входящих в групповой эталон.

Схема измерений такая же, как и в I этапе раздела А.

Измерения II этапа

Эталонирование переходной катушки № 89 (100:10)

$$\left. \begin{aligned} 1. |V_1| - |n_1| &= b_1 \\ 2. |V_1| - |n_2| &= b_2 \\ 3. |n_1| - |n_2| &= b_3 \\ 4. |V_2| - |n_3| &= b_1' \\ 5. |V_2| - |n_4| &= b_2' \\ 6. |n_3| - |n_4| &= b_3' \end{aligned} \right\}$$

Кроме того, предыдущими эталонированиями было установлено:

$$\left. \begin{aligned} |n_1| - |n_2| &= b_0 \\ |n_3| - |n_4| &= b_0' \end{aligned} \right\}$$

В результате вычисляем отношение секций переходной катушки:

$$\left| \frac{V_1}{V_2} \right|$$

Примечание 1. Отношение $\left| \frac{V_1}{V_2} \right|$ устанавливается один раз и для 1000 и для 10 000 Ω , так как измерения 1000-омных катушек охватывают небольшой промежуток времени и бояться изменения отношения секций особенно не приходится.

Примечание 2. Так как I и III этапы проводятся методом моста Витстона, а II — компенсационным, то последний (для сокращения времени) проводится перед I этапом.

Измерения III этапа

Сравнения каждой катушки А, В и С группового эталона с 2 эталонами предыдущего значения N_1 и N_2 :

$$1. |A| \Rightarrow |N_1| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_1) = A_1$$

Контроль

Осуществляется тот же контроль, как и в I этапе раздела А.

Исключая из уравнений (1) и (2) $|V_1|$ и из (4) и (5) $|V_2|$, получим:

$$\left. \begin{aligned} |n_1| - |n_2| &= b_2 - b_1 \\ |n_3| - |n_4| &= b_2' - b_1' \end{aligned} \right\}$$

Если $b_2 - b_1 = b_3$

и $b_2' - b_1' = b_3'$,

то измерения II этапа произведены правильно. Кроме того, равенства $b_2 = b_0$ и $b_2' = b_0'$ указывают на неизменность эталонов в 100 и 10 Ω , а следовательно, отношение $\left| \frac{V_1}{V_2} \right|$ определено верно.

1-й контроль

Сходимость значений A_1 и A_2 ; B_1 и B_2 ; C_1 и C_2 служит признаком правильности произведенных измерений.

Однако возможен случай, когда N_1 и N_2 после их эта-

2. $|A| = |N_2| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_2) = A_2$
3. $|B| = |N_1| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_3) = B_1$
4. $|B| = |N_2| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_4) = B_2$
5. $|C| = |N_2| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_5) = C_1$
6. $|C| = |N_2| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_6) = C_2$

Здесь под $(1 + k_1)$, $(1 + k_2)$,
 подразумеваются вы-
 ражения, стоящие в квадрат-
 ных скобках формул (4) и (5),
 т. е.

$$\left[1 - \frac{V_1}{R_1} - V_1 \frac{d_1}{d_1 - d_2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right]$$

или

$$\left[1 + \frac{V_2}{R_1} + V_2 \frac{d_1}{d_1 - d_2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right]$$

Из уравнений (1—6) вычис-
 ляем

$$|A| = \frac{A_1 + A_2}{2} = f_1$$

$$|B| = \frac{B_1 + B_2}{2} = f_2$$

$$|C| = \frac{C_1 + C_2}{2} = f_3$$

Если же $A_1 \neq A_2$, $B_1 \neq B_2$, $C_1 \neq C_2$, то это свидетельствует или
 о наличии ошибок в измерениях, или о том, что катушки N_1
 и N_2 после их эталонирования изменились не на одинаковую
 величину каждая. Однако в последнем случае мы должны по-
 лучить:

$$A_1 - A_2 = B_1 - B_2 = C_1 - C_2.$$

Таким образом, мы всегда можем видеть источник ошибок.
 2-й контроль. Из вычисленных значений A , B и C определяем

$$\begin{aligned} |A| - |B| &= f_1 - f_2 \\ |A| - |C| &= f_1 - f_3 \\ |B| - |C| &= f_2 - f_3 \end{aligned}$$

лонирования претерпели такие
 изменения, что все-таки

$$A_1 = A_2, B_1 = B_2, C_1 = C_2$$

и катушки A , B и C получат
 искажённые на одну и ту же
 величину значения.

Поэтому, несмотря на схо-
 димость результатов, необхо-
 димо произвести контрольные
 сравнения катушек A , B и C
 с третьим эталоном N_3 того
 же значения, что и N_1 и N_2 .

При этом получим:

$$|A| = |N_3| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_7) = A_3$$

$$|B| = |N_3| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_8) = B_3$$

$$|C| = |N_3| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_9) = C_3$$

Сходимость трёх резуль-
 татов, т. е.

$$\begin{aligned} A_1 &= A_2 = A_3 \\ B_1 &= B_2 = B_3 \\ C_1 &= C_2 = C_3 \end{aligned}$$

служит достаточной гарантией
 правильности измерения и не-
 изменности эталонов, а, сле-
 довательно, правильности уста-
 новления значений A , B и C .

и соответствующие отклонения d_1 ; d_2 ; d_3 катушек A , B и C от среднего значения M .

В случае совпадения разностей и отклонений с соответственными из I этапа работа по установлению группы на этом заканчивается.

Несовпадение говорит об изменениях катушек A , B и C после I этапа и численно указывает их.

Для подтверждения этих изменений следует произвести измерения IV этапа, совершенно аналогичные измерениям I этапа.

Г. Установление групповых эталонов 100 000 Ω

Обозначения. Катушки группового эталона A , B и C . Два эталона ближайшего низшего порядка N_1 и N_2 . Вместо переходной катушки применены:

I эталонная катушка в 1000 Ω — V_1 } служащие двумя плечами
I " " " 100 Ω — V_2 } моста Витстона.

Измерения I и IV этапов

Взаимные сравнения катушек группового эталона.

Измерения такие же, как и в I этапе раздела A .

Измерения II этапа

Установления переходного эталона здесь нет.

Измерения III этапа

Сравнения каждой катушки A , B и C группового эталона с двумя катушками предыдущего значения (N_1 и N_2):

$$1. |A| = |N_1| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_1) = A_1$$

$$2. |A| = |N_2| \cdot \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \cdot (1 + k_2) = A_2$$

$$3. |B| = |N_1| \cdot \left| \frac{V_3}{V_2} \right| \cdot (1 + k_3) = B_1$$

$$4. |B| = |N_2| \cdot \left| \frac{V_3}{V_2} \right| \cdot (1 + k_4) = B_2$$

$$5. |C| = |N_1| \cdot \left| \frac{V_5}{V_2} \right| \cdot (1 + k_5) = C_1$$

$$6. |C| = |N_2| \cdot \left| \frac{V_5}{V_2} \right| \cdot (1 + k_6) = C_2$$

При установлении значений катушек в 100 000 Ω опаснее другое обстоятельство. В качестве двух плеч переходной катушки

Контроль тот же, что и в I этапе измерений эталонов в 1000 и 10 000 Ω .

1-й контроль

Сходимость двух результатов для одной и той же катушки является признаком правильности произведённых измерений.

При малом промежутке времени между установлением 10 000 и 100 000 Ω бояться изменений N_1 и N_2 особенно не приходится. В случае же необходимости такого контроля можно либо сравнить изучаемые катушки с третьим эталоном в 10 000 Ω — N_3 , либо, при отсутствии такового в группе, ограничиться сравнением N_1 и N_2 между собой.

в измерительной схеме участвуют 2 катушки: одна в 1000, а другая — в 100 Ω, так что в уравнения (1—6) входит с одним и тем же значением $\left|\frac{V_1}{V_2}\right|$ отношение сопротивлений катушки в 1000 Ω к сопротивлению катушки в 100 Ω. Поэтому возможные изменения двух последних за промежуток времени между установлением их значений и сравнением катушек в 100 000 Ω, как видно из уравнений (1—6), не могут вызвать расхождений между A_1 и A_2 ; B_1 и B_2 ; C_1 и C_2 , а исказят значения катушек A , B и C на одинаковую величину. В зависимости от величины изменения отношения $\left|\frac{V_1}{V_2}\right|$, в значения катушек в 100 000 Ω войдет соответствующая, одинаковая для всех, ошибка, несмотря на то, что точность производимых измерений может быть при этом очень высокой (что и произошло при эталонировании 100 000 Ω в 1939—1940 г).

Для контроля правильности отношения катушки в 1000 Ω к катушке в 100 Ω, проще всего, сравнить это отношение с отношением плеч переходной катушки № 89 по методу моста Витстона. Обозначив отношение сопротивлений катушек в 1000 Ω к 100 Ω через $\left|\frac{V_1}{V_2}\right|$, а плеч переходной катушки № 89 через $\left|\frac{100}{10}\right|$, получим

$$\left|\frac{V_1}{V_2}\right| = \left|\frac{100}{10}\right| \cdot (1 \pm k) = l.$$

Это отношение сопоставляем с соответствующим отношением l' , вычисленным из значений катушек 1000 и 100 Ω, полученных при их эталонировании. Если $l = l'$, то применяемые катушки не изменились. Если $l \neq l'$, то это возможно вследствие: 1) изменений катушек в 1000 и 100 Ω; 2) изменения отношения плеч переходной катушки № 89. Для выяснения причины неравенства требуется произвести взаимные сравнения всех катушек групповых эталонов в 1000 и 100 Ω.

2-й контроль такой же (также и выводы), как и при эталонировании 1000 и 10 000 Ω. Производится он после того, как имеется уверенность в правильности установленных значений A , B и C .

Применение разобранной здесь системы контроля вскрывает на каждом этапе не только промахи и ошибки вычислений, но и систематические ошибки, так как контроль измерений разных по значениям эталонов, участвующих в процессе установления одной группы, достаточным образом обеспечивает возможность нахождения систематических ошибок. Но система контроля определяет лишь точность самого процесса установления. Для совершенно строгого определения точности установленного зна-

чения требуется еще учесть неизбежное накопление средних погрешностей, особенно при переходе от эталона одного значения к эталону следующего (вверх или вниз).

Следует заметить, что обработка результатов эталонирования катушек по способу наименьших квадратов применима не для всех этапов измерений. Для случая малого количества измерений такая обработка нецелесообразна; увеличение же количества измерений удлиняет работу, чего надо было избегать, вследствие изменчивости эталонов, принимая во внимание необходимость последовательного перехода от одного значения к другому.

Кроме того, этот способ не выявляет тех систематических ошибок, которые немедленно обнаруживает система контроля.

Установление набора эталонов сопротивления, как было сказано выше, состоит в определении значений всех эталонов различных групп.

По своему содержанию процесс установления эталонов сопротивления является по существу первой частью важнейшей метрологической работы, которая носит название „хранение и поддержание эталонов электрического сопротивления“.

После того, как набор эталонов установлен, дальнейшей задачей является изучение состояния катушек во времени (поддержание эталонов). Практика долгих лет изучения катушек показала, что в своём большинстве они не сохраняют постоянства сопротивления, несмотря на хорошие условия хранения.

Необходимость периодического эталонирования рабочих эталонов сопротивления поэтому очевидна.

Вследствие изменчивости катушек, определить в каждый данный момент действительное значение сопротивления любой эталонной катушки не представляется возможным без повторения с самого начала процесса эталонирования всех эталонов сопротивления, предшествующих этому значению.

Поэтому определённые для всех эталонов значения сохраняются за ними впредь до нового полного эталонирования. Тем самым мы вводим в текущие измерения ошибку, заставляющую говорить о точности поддержания эталонов.

С другой стороны, необходимо отметить, что в настоящее время, благодаря применению соответствующим образом подобранной аппаратуры, достигнута очень высокая точность измерений (от нескольких сотых долей процента для 1 и 10 Ω до 0,0002 — 0,0003% для 0,01 Ω).

В силу этого, а также благодаря хорошо разработанной методике, точность установления значений эталонов также высока (от 0,0001 до 0,001%).

Таким образом, до настоящего момента имели место следующие соотношения точностей:

1. Точность измерения эталонов больше точности установления их значений, ввиду накопления погрешностей.

2. Точность установления значений эталонов больше точности поддержания, ввиду изменчивости их сопротивлений во времени.

Добиваясь увеличения точности поддержания эталонов, мы будем приближаться к точности их установления. Эти две точности сравниваются, по всей вероятности, только после нахождения таких сплавов и способов изготовления и старения, при которых проволока катушек будет очень хорошо стабилизирована.

Но одновременно с развитием техники, потребуется и бо́льшая точность установления эталонов, а это обязывает работать в направлении повышения точности измерений. Это возможно при применении более совершенных аппаратуры и условий производства измерений (термостатные комнаты, постоянная влажность и т. д.), чтобы исключить источники погрешностей, которые не поддаются учёту при настоящих условиях работы.

Для увеличения точности поддержания эталонов, при существующих катушках сопротивления, быстро изменяющих свои значения, необходимо, как можно чаще, производить эталонирование всего набора сопротивлений. Взаимные сравнения катушек группового эталона, производившиеся в виде контроля состояния катушек в промежутках между эталонированиями, не всегда обеспечивают положительные результаты. В этом можно убедиться на примере катушек в $0,01 \Omega$. С 1931 г. по 1940 г. разница между двумя эталонными катушками в $0,01 \Omega$ №№ 7017 и 7018 практически не изменилась, в то время как значения их сильно изменились (табл. 3).

Таблица 3

№№ катушек	Сопротивления катушек при 20°C		Изменения в %
	1931 г. (февраль)	1940 г. (апрель)	
7017	$0,01000070 \Omega$	$0,01000013 \Omega$	- 0,0057
7018	$0,01000049 \Omega$	$0,00999988 \Omega$	- 0,0061
$7017]_{20} - [7018]_{20}$	$+ 0,21 \mu\Omega$	$+ 0,25 \mu\Omega$	+ 0,0004

Кроме того, катушки, по всей вероятности, имеют не только возрастные изменения, но и другие, которые носят временный характер и которые можно приписать изменениям температуры и влажности. Эти изменения могут ликвидироваться после исчезновения вызывающих их причин.

При частых эталонированиях требуется каждое из них производить возможно быстрее. Этому же требует опасность сниже-

ния точности установления эталонов, особенно большого сопротивления, например, 100 000 Ω , значения которых определяются значениями не только катушек в 10 000 Ω , но и 1000 и 100 Ω .

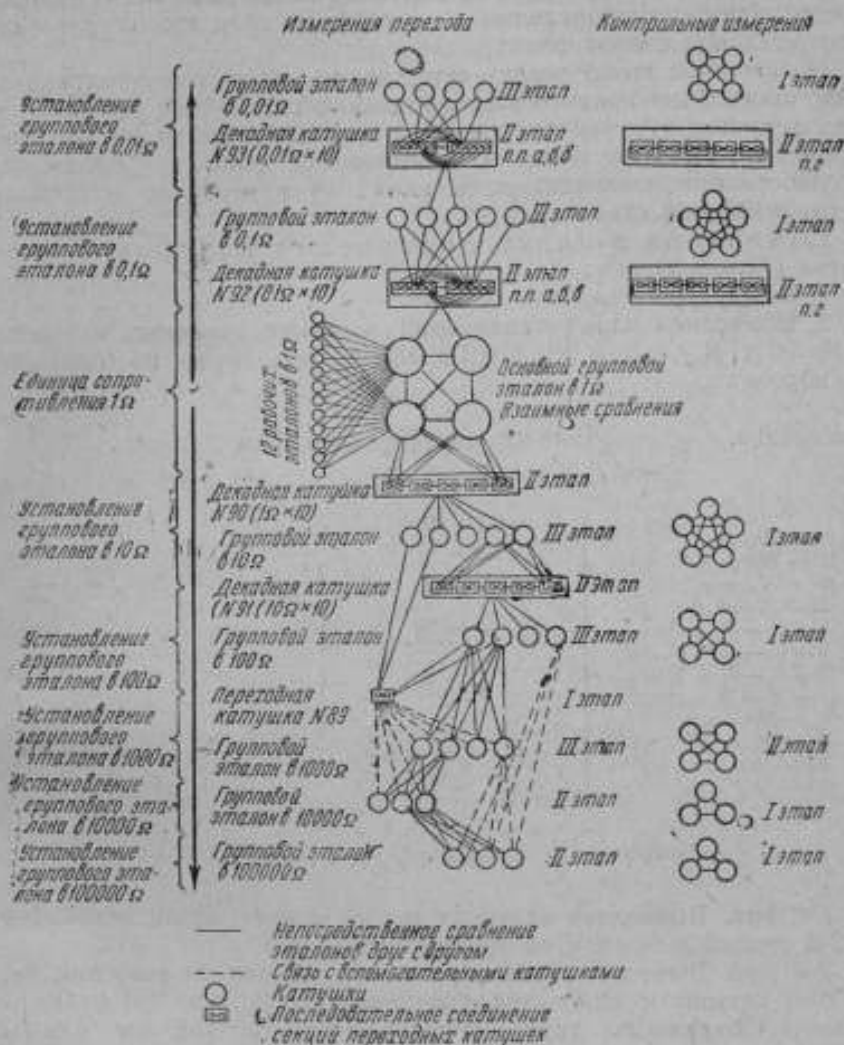


Рис. 4. Новая схема № 3 установления полного набора эталонных сопротивлений от 0,01 Ω до 100 000 Ω .

Последние к этому времени могут сами измениться. Такое явление действительно обнаружилось при установлении группового эталона в 10 000 Ω в начале 1940 г. Катушки в 100 и 1000 Ω ,

проэталонированные в июле и августе 1939 г., к 1 кварталу 1940 г. сами изменились, исказив сильно значения 100 000 Ω . Выяснилось это только после большого количества измерений, произведённых для раскрытия картины, после чего встал вопрос о необходимости проведения в кратчайший срок эталонирования всех эталонов сопротивления.

Изложенное выше делает естественным стремление сохранить срок проведения полного эталонирования как за счёт увеличения лиц, ведущих эту работу, так и за счёт сокращения количества измерений. Поэтому новое эталонирование было предположено на лабораторном совещании в мае 1940 г. вести по несколько видоизменённой схеме (рис. 4).

Изменения в плане построения измерений сводятся к следующему:

1. Всюду уничтожается IV этап.

2. Измерения для установления значений декадных катушек №№ 90 ($1 \Omega \times 10$) и 91 ($10 \Omega \times 10$) производятся по приёмам калибровки:

Измерения.

Вычисления (производятся 2 раза)

1-й раз

2-й раз

$$\begin{array}{l}
 1. |1 - N_1| = a_1 \\
 2. |1 - N_2| = a_2 \\
 3. |2 - N_1| = a_3 \\
 4. |2 - N_2| = a_4 \\
 5. |1 + 2 - 3 + 4| = a_5 \\
 6. |3 + 4 - 5 + 6| = a_6 \\
 7. |5 + 6 - 7 + 8| = a_7 \\
 8. |7 + 8 - 9 + 10| = a_8 \\
 9. |9 - N_1| = a_9 \\
 10. |9 - N_2| = a_{10} \\
 11. |10 - N_1| = a_{11} \\
 12. |10 - N_2| = a_{12}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 |1| = \frac{|N_1| + |N_2|}{2} + \\
 \quad + \frac{a_1 + a_2}{2} \\
 |2| = \frac{|N_1| + |N_2|}{2} + \\
 \quad + \frac{a_3 + a_4}{2} \\
 |3 + 4| = |1 + 2| - a_5 \\
 |5 + 6| = |3 + 4| - a_6 \\
 |7 + 8| = |5 + 6| - a_7 \\
 |9 + 10| = |7 + 8| - a_8
 \end{array}
 \right.
 \left\{
 \begin{array}{l}
 |10| = \frac{|N_1| + |N_2|}{2} + \frac{a_{11} + a_{12}}{2} \\
 |9| = \frac{|N_1| + |N_2|}{2} + \frac{a_9 + a_{10}}{2} \\
 |7 + 8| = |9 + 10| + a_8 \\
 |5 + 6| = |7 + 8| + a_7 \\
 |3 + 4| = |5 + 6| + a_6 \\
 |1 + 2| = |3 + 4| + a_5
 \end{array}
 \right.$$

Получаем

$\Sigma 10$

$\Sigma 10$

1-й раз. Вычисляем значения сумм, исходя из значений 1-й и 2-й секций и используя уравнения (1—8).

2-й раз. Вычисляем значения сумм, исходя из значений 9-й и 10-й секций и используя уравнения от (12) до (5) включительно. Сходимость двух значений одной и той же суммы является контролем правильности произведённых измерений.

Описанная методика теоретически была разработана профессором М. Ф. Маликовым и практически проводилась им и под его руководством в Лаборатории электрических мер ВНИИМ. При этом в первоначальную схему вносились различные поправки. Первоначальная схема, а также и последующие поправки нашли отражение в метрологической литературе, но в настоящем (более

или менее установившемся) виде данная схема публикуется впервые. Система контроля, на разработку которого автор обращал особое внимание, была установлена в самые последние годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проф. М. Ф. Маликов и Е. К. Вессо-Адо. Эталонные катушки сопротивления Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии и стандартизации. Труды ВИМС, 1938, № 127.
2. Проф. М. Ф. Маликов. Метод и оборудование для сравнения эталонов электрического сопротивления. Изд. ВИМС, 1932 № 100.
3. Jäger. Elektrische Messtechnik, 1922.

ОБ УСТАНОВЛЕНИИ НОРМАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПАРА- И ДИАМАГНИТНЫХ ТЕЛ

Одной из задач, поставленных Магнитной лабораторией ВНИИМ, является установление нормальных образцов магнитной восприимчивости пара- и диамагнитных тел, а также определение магнитной восприимчивости, как физической константы, для некоторых химически чистых пара- и диамагнитных соединений.

Такая задача была поставлена в 1938 г. и частично была решена в том же году [1]. Однако результаты, полученные при определении магнитной восприимчивости $MnCl_2$, $Mn_2P_2O_7$ и CoF_2 , взятых в качестве нормальных образцов, не давали той точности, которая возможна при использовании методов измерений, предложенных Фарадеем и Гуи и принятых Магнитной лабораторией.

Кроме того, величина удельной магнитной восприимчивости χ для указанных соединений не совпадала с данными, полученными другими авторами, особенно для $Mn_2P_2O_7$ и CoF_2 , где расхождения достигали 40% ($\chi = 66 \cdot 10^{-6}$ CGS $_{\mu_0}$ вместо $\chi = 103 \cdot 10^{-6}$ CGS $_{\mu_0}$ для $Mn_2P_2O_7$; и $\chi = 76 \cdot 10^{-6}$ CGS $_{\mu_0}$ вместо $103 \cdot 10^{-6}$ CGS $_{\mu_0}$ для CoF_2).

Последующий химический анализ подтвердил высказанное тогда предположение о загрязнении химического состава образцов, приготовленных по заказу ВНИИМ Институтом чистых реактивов в Москве.

Поэтому было решено ещё раз произвести анализ погрешностей методов Гуи и Фарадея и на основании этого анализа спроектировать новую установку, позволяющую измерять магнитную восприимчивость с большей точностью.

Кроме того, было решено (совместно с Химической лабораторией ВНИИМ) в качестве нормальных образцов магнитной восприимчивости выбрать соединения Mn_2O_3 и Cr_2O_3 , как наиболее устойчивые в химическом отношении и не содержащие влаги. Изготовление химически чистых соединений этих образцов взяла на себя Химическая лаборатория ВНИИМ.

В результате этой работы удалось получить химически чистое соединение Cr_2O_3 и Mn_2O_3 , определить величину их магнитной восприимчивости, хорошо совпадающую с данными дру-

гих авторов, разработать спецификацию на нормальные образцы магнитной восприимчивости и технические условия на проектирование и изготовление новой установки по методу Гун и Фарадея, которая должна обеспечить повышенную точность измерений магнитной восприимчивости.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Для представления о том, с какой точностью производится в настоящее время измерения магнитной восприимчивости, необходимо обратиться к опытным данным, полученным различными наблюдателями для одного и того же вещества. В табл. 1 приведены значения магнитной восприимчивости некоторых парамагнитных солей и чистого марганца.

Сопоставляя эти данные, мы видим, что колебания в значениях χ достигают 30—40%, и даже у чистого марганца величина магнитной восприимчивости колеблется в пределах от 7,5 до $11,6 \cdot 10^{-3} CGS_{20}$, т.е. примерно около 40%. Такое отклонение нельзя объяснить систематическими погрешностями методов измерений, а главную роль в этом отношении надо приписать методике приготовления того или иного химического соединения или элемента.

На величину магнитной восприимчивости влияет не только степень химической „загрязненности“ соединения, но и, по всей вероятности, аллотропические состояния, а также химический состав вещества. Так, например, соединение закись — окись марганца по соотношению в нём элементов Mn и O вполне оправдывается химической формулой Mn_2O_4 , но в действительности оно может представлять смесь соединений MnO , Mn_2O_3 и Mn_3O_4 . Точно так же чистый марганец, не имеющий никаких примесей, может быть в различных аллотропических состояниях, смешанных в различных пропорциях и обладающих различными значениями магнитной восприимчивости.

Поэтому, при установлении константы магнитной восприимчивости какого-либо элемента или соединения, наряду с разработкой методики измерений, обеспечивающей ту или иную точность определения магнитной восприимчивости, должно быть обращено особое внимание на методы химического приготовления и химической очистки данного вещества.

При рассмотрении же погрешностей, вызываемых методом измерений, необходимо различать два вида погрешностей: погрешности при абсолютном способе измерения и погрешности при относительном способе. Погрешность при относительных измерениях всегда меньше погрешности при абсолютных мето-

Таблица 1

Вещество (химический состав)	Удельная восприимчивость, $\chi \cdot 10^6$ CGS ₁₀	Автор	Названия журналов, из которых заимствованы данные
Cr ₂ O ₃	+24	Ст. Мейер (St. Meyer)	„Ann. d. Phys.“ 1, 664—668, 1900
	25,5	Хонда и Зонне (Honda and Sonne)	„Sc. Rep. Toh. Univ.“ 2, 1, 1913
	26	Ведекинд (Wedekind)	„Berl. Chem. Ges.“ 54, 253, 1921
	от +19 до +40	Альбрехт и Ведекинд (Albrecht und Wedekind)	„Zs. f. anorg. Chem.“ 210, 105, 1933
CoCl ₂	+101	Квинке (Quinke)	„Wied. Annalen.“ 34, 401, 1888
	82	Егер и Мейер (Jäger und Meyer)	„Wied. Annalen.“ 67, 427 и 707, 1899
	81	Либкнехт и Вильс (Liebknecht und Wills)	„Ann. d. Phys.“ 1, 178, 1910
	90,5	Ишивара (Ishiwara)	„Sc. Rep. Toh. Univ.“, 5, 53, 1916
	96,3	Феодорид (Theodorides)	„Arch. Sc. Phys.“ 3, 161, 1921
	79,4	Фалькенберг (Faickenberg)	„Zs. Phys.“ 5, 70 и 201, 1921
MnO	+75,9	Хонда (Honda)	„Sc. Rep. Toh. Univ.“ 2, 1, 1913
	56,2	Ведекинд (Wedekind)	„Berl. Chem. Ges.“ 54, 253, 1921
	67,5	Феодорид (Theodorides)	„Arch. Sc. Phys.“ 3, 161, 1921
Mn ₂ O ₄	+65,5	Ведекинд и Херст (Wedekind und Horst)	„Berl. Chem. Ges.“ 45, 262, 1912 и 48, 105, 1915
	55,8	Хонда (Honda)	„Sc. Rep. Toh. Univ.“ 2, 1, 1913
	74,3	Фейтис (Feytis)	„C. R.“ 152, 710, 1911
	68,0	Херроу и Вильсон (Harrow and Wilson)	„Proc. Phys. Soc.“ 33, 195, 1921

Вещество (химический состав)	Удельная восприимчи- вость $\chi \cdot 10^6$ CGS ₁₀	А автор	Названия журналов, из которых заимствованы данные
Марганец	+ 10,5	Хонда (Honda)	„Ann. d. Phys.“ 32, 1027, 1910
	10,0	Хонда и Зонне (Honda and Sonné)	„Sc. Rep. Toh. Univ.“ 2, 1, 1913
	8,93	Оуэн (Owen)	„Ann. d. Phys.“ 37, 657, 1912
	9,66	Ишивара (Ishiwara)	„Sc. Rep. Toh. Univ.“ 5, 53, 1916
	9,6	Уилер (Wheeler)	„Phys. Rev.“ 41, 331, 1932
	11,6	Бэте (Bates)	„Proc. Phys. Soc.“ 47, 197, 1935
	7,53	Шимцу (Shimizu)	„Sc. Rep. Toh. Univ.“ 19, 411, 1930

дах, но зато в них всегда вносится элемент систематической погрешности, обусловленной погрешностью абсолютного определения восприимчивости нормального образца, с которым производится сравнение. Чтобы судить о точности методики измерений в табл. 2, 3 и 4, приводятся результаты многократных измерений магнитной восприимчивости одного и того вещества различными авторами.

Измерение магнитной восприимчивости воды по абсолютному методу Квинке, произведенное Ауэром (Auer) [2] дало значение $\chi = 0,72183 \pm 0,00048$, CGS₁₀ с погрешностью 0,067%.

Эти данные приводят нас к заключению, что существующая методика может обеспечить измерение магнитной восприимчивости с погрешностью до 0,1%. Между тем в большинстве случаев наблюдения дают погрешность больше 1%. Поэтому необходимо проанализировать методику измерений с целью выявления причин, обуславливающих появление этих погрешностей, с тем чтобы в дальнейшем иметь возможность их устранить.

В первой части нашей работы „Об установлении нормальных образцов магнитной восприимчивости парамагнитных тел“, при рассмотрении методов Фарадея и Гуи, уже были даны пределы тех погрешностей в определении χ , которые вызываются погрешностями непосредственно измеряемых величин [1]. Однако для более глубокого анализа необходимо оценить и погрешности, вызываемые другими причинами, которые явно не входят в установленные формулы расчета. Особенно это важно при конструировании и расчете нового прибора, который давал бы результаты с наиболее высокой точностью.

Метод Гуи. Формула, связывающая величину объемной магнитной восприимчивости χ с силой притяжения F и размерами испытываемого тела, имеет вид

Таблица 2

Автор	M. Wheeler Мэри Уилер, Phys. Rev. 41, 331, 1932.			
Вещество	Марганец			
Метод	Астатический магнитометр. Метод относительный			
Образец α . Отсчеты по магнитометру, пропорциональные X		Образец β . Отсчеты по магнитометру, пропорциональные Y		
1,989	2,074	1,718	1,780	
2,038	2,077	1,720	1,791	
2,067	2,061	1,723	1,754	
2,070	2,075	1,734	1,788	
2,093	2,090	1,747	1,800	
2,076	2,108	1,737	1,769	
2,069	2,095	1,731	1,794	
2,055	2,075	1,743		
Среднее $2,076 \pm 0,006$		Среднее $1,754 \pm 0,005$		
Средняя квадратичная погрешность одного наблюдения $\pm 1\%$ Разность между максимальным и минимальным значениями 5%		Средняя квадратичная погрешность одного наблюдения $\pm 1,2\%$ Разность между максимальным и минимальным значениями 5%		

Таблица 3

Автор	Weiss et Foix (Вейсс и Фокс), Journ. de Phys. 1, 274, 1941	
Вещество	Нитраты никеля и кобальта (растворы в воде)	
Метод	Фарадея, абсолютный	
Нитрат никеля (раствор № 2)	6,05; 6,01; 5,97 сред. $6,01 \cdot 10^{-6} CGS_{\rho_0}$	
Нитрат кобальта	14,40; 14,39; 14,48 сред. $14,42 \cdot 10^{-5} CGS_{\mu^0}$	
Нитрат никеля (раствор № 1)	9,45; 9,43; 9,59 сред. $9,49 \cdot 10^{-5} CGS_{\rho_0}$	
Погрешность одного измерения $\pm 1\%$		

Автор	Gray and Farquharson (Грей и Фаргхарсон) Journ. Sc. Inst. 9, 1, 1932.	
Метод	Фарадея, относительный (при помощи крутильных весов)	
Вещество	Молекулярная восприимчивость $\chi_{10^{-6}CGS}_{\lambda_0}$	Погрешность в процен- тах
NH ₃	17,05 ± 0,41	± 2,5
NCl	23,05 ± 0,20	0,96
HBr	31,45 ± 0,15	0,48
HI	49,29 ± 1,36	2,8
NH ₄ Cl	35,71 ± 0,47	1,3
NH ₄ Br	46,71 ± 0,36	0,77
KCl	36,15 ± 0,36	1,0
KBr	48,12 ± 0,75	1,77

$$F = \frac{\chi}{2} \int \int \int \text{grad } H^2 d\tau, \quad (1)$$

где H — напряжённость поля в какой-либо части испытываемого тела, имеющего объём $d\tau$, и интегрирование распространяется геометрически на весь объём данного тела. Раскладывая $\text{grad } H^2$ на его составляющие и предполагая, что испытываемое тело имеет форму цилиндра или призмы, с малой площадью поперечного сечения, мы можем написать

$$F = \chi s \left[i \int_0^{z_0} H \frac{\partial H}{\partial x} dz + j \int_0^{z_0} H \frac{\partial H}{\partial y} dz + k \int_0^{z_0} H \frac{\partial H}{\partial z} dz \right]$$

где s — площадь сечения цилиндра, z_0 — его высота и dz — элемент высоты. При этом предполагается, что ось цилиндра направлена по оси z -ов. Интегрируя, находим

$$F = k \frac{\chi s}{2} (H_1^2 - H_0^2) + \chi s \left[i \int_0^{z_0} H \frac{\partial H}{\partial x} dz + j \int_0^{z_0} H \frac{\partial H}{\partial y} dz \right] \quad (2)$$

где H_1 и H_0 в первом члене — значения напряженности, соответствующие значениям $z = z_0$ и $z = 0$, т. е. на концах цилиндра.

Составляющие по осям координат, очевидно, будут:

$$F_z = \frac{\chi s}{2} (H_1^2 - H_0^2); F_x = \frac{\chi s}{2} \int_0^{z_0} H \frac{\partial H}{\partial x} dz; F_y = \chi s \int_0^{z_0} H \frac{\partial H}{\partial y} dz. \quad (3)$$

Погрешность в определении вертикальной составляющей получится путём дифференцирования формулы для F_z , считая x функцией температуры t , а H_1 — функцией координат и силы тока:

$$\frac{\Delta F_z}{F_z} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{2H_1}{H_1^2 - H_0^2} \left(\frac{\partial H_1}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial H_1}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial H_1}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial H_1}{\partial i} \Delta i + \Delta H_1 \right) + \frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial t} \Delta t + \frac{\Delta x}{x} - \frac{2H_0}{H_1^2 - H_0^2} \Delta H_0.$$

Пренебрегая в знаменателе членом H_0^2 , получим

$$\frac{\Delta F_z}{F_z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{2}{H_1} \left(\frac{\partial H_1}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial H_1}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial H_1}{\partial z} \Delta z \right) + \frac{2\Delta H_1}{H_1} + \frac{2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial i} \Delta i + \frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial t} \Delta t - 2 \left(\frac{H_0}{H_1} \right)^2 \frac{\Delta H_0}{H_0},$$

где i — сила тока в цепи электромагнита.

Магнитное поле между полюсами электромагнита симметрично относительно оси полюсных наконечников, совпадающей с осью x , поэтому $\frac{\partial H_1}{\partial y} = \frac{\partial H_1}{\partial x}$, кроме того, ввиду однородности магнитного поля H_1 эта величина мала и ею можно пренебречь. Также можно пренебречь последним членом, ввиду малости отношения $\left(\frac{H_0}{H_1}\right)^2$.

Далее, на основании формулы (3), мы можем написать

$$\frac{\partial F_x}{\partial z} = x s H_1 \frac{\partial H_1}{\partial x},$$

откуда

$$2 \frac{\partial H_1}{\partial x} = \frac{2}{x s H_1} \frac{\partial F_x}{\partial z} = \frac{2 H_1}{x s H^2} \frac{\partial F_x}{\partial z} = \frac{1}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z}.$$

Поэтому

$$\frac{\Delta F_z}{F_z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{1}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \Delta x + \frac{2\Delta H_1}{H_1} + \frac{2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial i} \Delta i + \mu \Delta t, \quad (4)$$

где $\mu = \frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial t}$ представляет собой температурный коэффициент магнитной восприимчивости.

Смещение Δx в направлении оси x -ов обусловлено наличием составляющей F_x , которая уравновешивается составляющей силы тяжести f образца, поэтому величину Δx можно определить из условия равновесия $F_x = f$.

Положим, что образец массы m подвешен на нити длиной l и пусть Δx — расстояние, на которое сместится образец в горизонтальном направлении под влиянием силы F_x (рис. 1). Тогда при равновесии составляющие силы тяжести mg и силы F_x в направлении, перпендикулярном к нити подвеса, должны быть равны, т. е.

$$mg \sin \alpha = F_x \cos \alpha,$$

где α — угол, на который отклоняется нить подвеса. Ввиду малости угла $\alpha \cos \alpha$ можно положить равным единице, а угол α заменить отношением $\frac{\Delta x}{l}$. В этом случае

$$mg \frac{\Delta x}{l} = F_x,$$

или

$$\Delta x = \frac{F_x l}{mg},$$

т. е. смещение тем меньше, чем меньше длина подвеса и чем больше вес образца.

Подставив это значение Δx в уравнение (4), получим

$$\begin{aligned} \frac{\Delta F_z}{F_z} = & \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{F_x}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \frac{l}{mg} + 2 \frac{\Delta H_1}{H_1} + \\ & + \frac{2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial l} \Delta l + \mu \Delta t. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим каждую погрешность в отдельности:

1. Погрешность $\frac{\Delta F_z}{F_z}$ представляет погрешность в определении силы, уравновешивающей притяжение образца.

Если уравновешивание производится рычажными весами, то $\frac{\Delta F_z}{F_z} = \frac{\Delta M}{M}$, где M — масса разновесов, необходимая для равновесия весов при включении тока в электромагните.

2. $\frac{\Delta x}{x}$ — погрешность в определении магнитной восприимчивости образца.

3. $\frac{\Delta s}{s}$ — погрешность непосредственного измерения площади сечения образца.

4. $\frac{F_x}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \frac{l}{mg}$ — систематическая погрешность, вызванная нали-

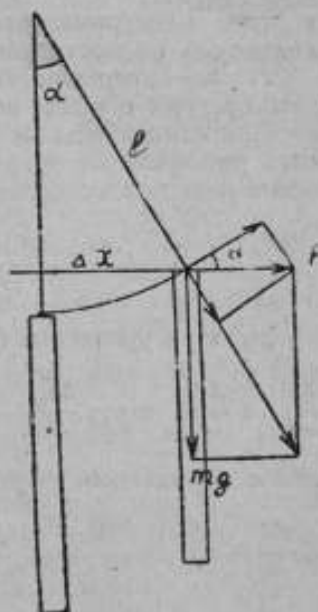


Рис. 1.

нием горизонтальных сил притяжения. Как видно из самого выражения, величина её не зависит от каких-либо случайных погрешностей измерений, являясь величиной постоянной, зависящей лишь от конструкции прибора. Вследствие этого она и может быть названа систематической погрешностью.

5. $2 \frac{\Delta H_1}{H_1}$ погрешность непосредственного измерения напряжённости магнитного поля между полюсами электромагнита.

6. $\frac{2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial i} \Delta i$ — погрешность, обусловленная колебаниями тока в цепи электромагнита во время измерений; Δi — отклонение силы тока от постоянного значения.

7. $\mu \Delta t$ — погрешность, связанная погрешностью определения температуры образца во время измерений.

При относительном способе определения χ мы можем написать подобное же уравнение для нормального образца с известной магнитной восприимчивостью χ_0 , а именно:

$$\frac{\Delta F_{z0}}{F_{z0}} = \frac{\Delta \chi_0}{\chi_0} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{F_{x0}}{F_{z0}} \frac{\partial F_{x0}}{\partial z} \frac{l}{m_0 g} + 2 \frac{\Delta H_1}{H_1} + 2 \frac{1}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial i} \Delta i_0 + \mu \Delta t_0 \quad (6)$$

Вычитая уравнение (6) из уравнения (5) и заменяя $\frac{\Delta F_z}{F_z}$ через $\frac{\Delta M}{M}$, а $\frac{\Delta F_{z0}}{F_{z0}}$ через $\frac{\Delta M_0}{M_0}$, где M_0 — масса разновесов при измерении с нормальным образцом, получим

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M}{M} - \frac{\Delta M_0}{M_0} = \frac{\Delta \chi}{\chi} - \frac{\Delta \chi_0}{\chi_0} + \frac{l}{mg} \frac{F_x}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{l}{m_0 g} \frac{F_{x0}}{F_{z0}} + \frac{2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial i} \Delta i - \\ - \frac{2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial i} \Delta i_0 + \mu \Delta t - \mu \Delta t_0. \end{aligned}$$

Таким образом, средняя квадратичная погрешность при абсолютном способе определения магнитной восприимчивости выразится формулой

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \chi}{\chi} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \chi_0}{\chi_0}\right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta H_1}{H_1}\right)^2 + \frac{4}{H_1^2} \left(\frac{\partial H_1}{\partial i}\right)^2 \Delta i^2 + \mu^2 \Delta t^2 + \\ + \left(\frac{F_x}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \frac{l}{mg}\right)^2}. \end{aligned}$$

а при относительном способе, считая, что

$$|\Delta i| = |\Delta i_0|, |\Delta t| = |\Delta t_0| \text{ и } \left| \frac{l}{mg} \frac{F_x}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \right| = \left| \frac{l}{mg} \frac{F_{x0}}{F_{z0}} \frac{\partial F_{x0}}{\partial z} \right|,$$

$$\frac{\Delta x}{x} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta x_0}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M_0}{M_0}\right)^2 + \frac{8}{H} \left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)^2 \Delta t^2 + 2\mu^2 \Delta t^2 + 2 \left(\frac{F_x}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \frac{l}{mg}\right)^2}$$

При малых значениях восприимчивости образца χ однородность магнитного поля почти не нарушается, поэтому горизонтальная сила F_x и производная $\frac{dF_x}{dz}$ очень мало отличаются от нуля, вследствие чего членом $\left(\frac{F_x}{F_z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \frac{l}{mg}\right)^2$ можно пренебречь.

При больших значениях χ магнитное поле между полюсами искажается полем намагниченного образца, появляется неоднородность в структуре поля и сила F_x и её производная могут принять заметную величину. Поэтому погрешность, вызываемая наличием горизонтальной силы, может иметь место только при больших значениях магнитной восприимчивости.

Положим, что напряжённость поля между полюсами электромагнита $H = 1200$ Oe и площадь сечения образца $s = 0,3$ см². За нормальный образец принята вода, имеющая $\chi = 0,72 \cdot 10^{-6}$ CGS_{в.с.}, а испытуемый образец обладает восприимчивостью $\chi = 5 \cdot 10^{-6}$ CGS_{в.с.}

Тогда, согласно формуле (3), $M = \frac{F_z}{g} = \frac{\chi s H^2}{2g} = 110$ мг и $M_0 = 15,5$ мг. Для парамагнитных тел, подчиняющихся закону Кюри, $\mu = 0,0037$, изменение же напряжённости поля при изменении силы тока на один ампер положим равным 200 Oe на 1 А [см. Сборник трудов ВНИИМ №1, стр. 35, табл. 5, (43)]. В таком случае, считая погрешности измерений $\Delta M = \Delta M_0 = 0,05$ мг; $\Delta i = 0,1$ А, $\Delta H = 60$ Oe; $\Delta x_0 = 0$, $\Delta t = 1^\circ$; $\Delta s = 0,0003$ см², получим при относительном способе

$$\frac{\Delta x}{x} = \pm \sqrt{(0,0005)^2 + (0,005)^2 + (0,013)^2 + (0,0037)^2} = 0,015 \text{ (или } 1,5\% \text{)},$$

а при абсолютном

$$\frac{\Delta x}{x} = \pm \sqrt{(0,0005)^2 + (0,001)^2 + 4(0,005)^2 + (0,013)^2 + (0,0037)^2} = 0,019 \text{ или } 1,9\%.$$

Как видим, наибольшую погрешность в определении χ при относительном способе вызывают колебания силы тока во время измерений, а при абсолютном, кроме того, и погрешность определения площади сечения образца S . Если колебания тока не будут превосходить 0,01 А при $i = 10$ А, то погрешность $\frac{\Delta x}{x}$ при относительном способе получается равной 0,63%.

Необходимо иметь в виду, что в приведенные выше данные не вошли погрешности, вызываемые неоднородностью поля между полюсами электромагнита. Погрешность $\frac{\Delta x}{x}$, обусловленная неоднородностью поля в направлении оси z , как мы видели, выражается формулой

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial z} \Delta z,$$

где Δz — смещение образца по вертикали, которое может достигать до 2—3 мм. Поэтому, полагая $\Delta z = 0,3$ см, мы можем определить степень однородности поля, которой должен удовлетворять данный электромагнит, чтобы погрешность была меньше заданной величины $\pm \delta$, т. е.

$$\frac{\partial H_1}{\partial z} = \frac{\delta}{2} \frac{H_1}{\Delta z} = \frac{12000}{2,3} \delta = 2000 \delta \frac{\text{Oe}}{\text{мм}}.$$

Если $\delta = 0,001$, то

$$\frac{\partial H_1}{\partial z} = 2 \frac{\text{Oe}}{\text{мм}}.$$

Существующий электромагнит Магнитной лаборатории ВНИИМ имеет неоднородность по данным измерений

$$\frac{\partial H_1}{\partial z} \sim 50 \frac{\text{Oe}}{\text{мм}}.$$

Метод Фарадея. При помещении тела объёмом v в неоднородное магнитное поле возникает сила притяжения или отталкивания F , действующая на это тело и определяемая уравнением:

$$F = \frac{1}{2} \chi v \text{ grad } H^2, \quad (7)$$

где χ — магнитная восприимчивость и H — средняя величина напряжённости магнитного поля в объёме v .

Составляющие этой силы на оси x , y и z будут равны

$$F_x = \chi v H \frac{\partial H}{\partial x}, \quad F_y = \chi v H \frac{\partial H}{\partial y}, \quad F_z = \chi v \frac{\partial H}{\partial z}. \quad (7a)$$

Поэтому, измеряя какую-либо составляющую F_z , мы можем определить магнитную восприимчивость по формуле

$$\chi = \frac{F_z}{mH \frac{\partial H}{\partial z}}. \quad (8)$$

Для исключения неизвестной величины $H \frac{\partial H}{\partial z}$ пользуются тем,

что измеряют силу притяжения или отталкивания F_{z_0} , действующую на тело с известной проницаемостью, масса которого m_0 , примерно того же объема, что и масса испытуемого тела. Тогда

$$\chi_s = \frac{F_{z_0}}{m_0 H \frac{\partial H}{\partial z}}. \quad (9)$$

Если положение массы m_0 в междуполюсном пространстве то же самое, что и в положении массы m , то из уравнений (8) и (9) находим

$$\chi = \chi_0 \frac{F_z}{F_{z_0}} \frac{m_0}{m}. \quad (10)$$

Для того чтобы уравнение (10) было справедливо, необходимо иметь объем и форму массы m_0 идентичными объему и форме массы m .

При выводе формулы (7) предполагалось, что объем v настолько мал, что величину $H \frac{\partial H}{\partial z}$ можно считать постоянной во всем объеме v . Несоблюдение этого условия вызывает погрешности как систематического, так и случайного характера. Систематические погрешности могут быть в том случае, когда оба тела при любом числе повторных измерений устанавливаются всегда в одних и тех же местах, отличных одно от другого.

Положим, что массы m и m_0 при измерении силы F_z устанавливаются в разные места и что в первом месте напряженность поля — H , а во втором — H_0 . Тогда формула (10) примет вид

$$\chi = \chi_0 \frac{F_z}{F_{z_0}} \frac{m_0}{m} \frac{H_0}{H} \frac{\frac{\partial H_0}{\partial z}}{\frac{\partial H}{\partial z}},$$

или, обозначая для простоты произведение $H \frac{\partial H}{\partial z}$ через G , получим

$$\chi = \chi_0 \frac{F_z}{F_{z_0}} \frac{m_0}{m} \frac{G_0}{G}.$$

Дифференцируя, находим

$$\frac{d\chi}{\chi} = \frac{d\chi_0}{\chi_0} + \frac{dF_z}{F_z} - \frac{dF_{z_0}}{F_{z_0}} + \frac{dm_0}{m_0} - \frac{dm}{m} + \frac{dG_0}{G_0} - \frac{dG}{G}.$$

Средняя квадратичная погрешность определится формулой

$$\left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \nu_0}{\nu_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_z}{F_z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_{z_0}}{F_{z_0}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_0}{G_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2.$$

Для того, чтобы погрешность в определении χ_0^2 не превышала величины δ , необходимо произвести измерения сил F_z и F_{z_0} и масс m и m_0 , а также иметь постоянство G и G_0 , с погрешностью, не превышающей значения $\delta' = \frac{\delta}{\sqrt{7}}$.

Так, например, при $\delta = 0,1\%$, $\delta' = 0,04\%$.

Измерение массы и сил F_z с такой точностью не представляет затруднения. Посмотрим теперь, какой должна быть погрешность в установке измеряемого тела при заданной точности в $0,1\%$.

Напишем $\frac{\Delta G}{G}$ в такой форме:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{1}{G} \frac{\Delta G}{\Delta z} \Delta z,$$

тогда

$$\Delta z = \frac{\Delta G}{G} \frac{G}{\Delta G / \Delta z} = 0,0004 \frac{G}{\Delta G / \Delta z} \quad (11)$$

Величина G имеет порядок 10^8 , поэтому

$$\Delta z = 4 \cdot 10^4 \frac{\Delta G}{\Delta z}.$$

При измерении силы притяжения рычажными весами установку испытываемого тела можно производить с погрешностью, не меньшей одного миллиметра, и, следовательно, изменение величины G должно быть меньше $4 \cdot 10^4$ на 1 мм.

Для конических полюсов, расположенных горизонтально, функция G на бесконечности и в точке O имеет нулевые значения, а на некотором расстоянии от точки O принимает максимальное значение порядка 10^8 (при $H = 10^4 Oe$) (рис. 2). Так как расстояние этого максимума от точки O порядка нескольких миллиметров, то изменение величины G на этом участке будет порядка 10^6 . В точке же максимума это изменение делится равным нулю. Поэтому, казалось бы, для уничтожения погрешности, вызываемой неправильностью установки испытываемого тела, было бы достаточно поместить образец в точку максимума, где $\frac{\Delta G}{\Delta z} = 0$, так как из уравнения (11) следует, что при $\frac{\Delta G}{\Delta z} = 0$ погрешность установки Δz становится бесконечно большой.

В действительности же такой метод наблюдений, применяемый на практике, осложняется рядом побочных обстоятельств, которые не дают возможности использовать его в полной мере.

Первое обстоятельство—это наличие горизонтальных сил F_x и F_y , которые уничтожаются только при помещении образца на ось симметрии. При малейшем отступлении от этого положения сразу же появляются силы F_x и F_y , отклоняющие образец в горизонтальном направлении. Вследствие этого образец попа-

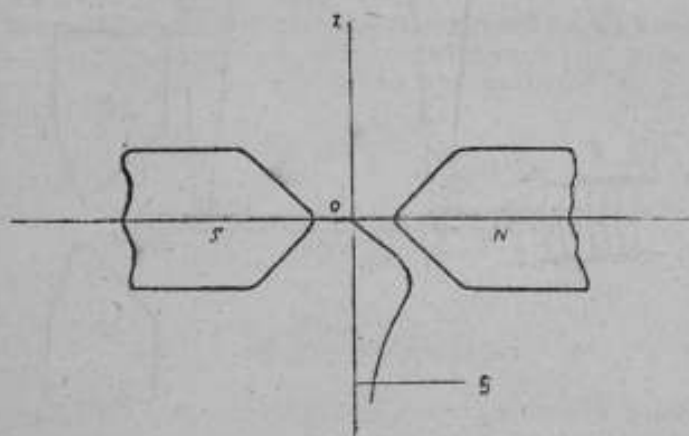


Рис. 2.

дает в другое место, где функция G имеет другое значение. Погрешность в определении λ , обуславливаемая этой причиной будет равна

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{g} \frac{\Delta G}{\Delta z} \Delta z$$

Второе обстоятельство, понижающее точность определения λ , — это относительно большие размеры испытуемого тела по сравнению с объемом того пространства, где производная функции G имеет значения, близкие к нулю, и несовпадение формы испытуемого и нормального образцов. Вследствие этого отдельные части образцов могут находиться в областях, где производная G имеет разные значения, и поэтому малейшее смещение тела может вызвать большую погрешность в определении λ .

Для уменьшения этих влияний на точность измерения λ необходимо каким-либо образом компенсировать горизонтальную силу и увеличить объем пространства, в котором функция G имела бы постоянное значение.

Наиболее удачное решение вопроса компенсации горизонтальных сил было дано Вейсом и Фуа [3], предложившими бифилярную подвесную систему для испытуемого образца (рис. 3). Образец помещается на конце стержня *aa*, горизонтально подвешенного на двух бифилярных нитях, так что может свободно перемещаться лишь в одном направлении, как это показано на рис. 3.

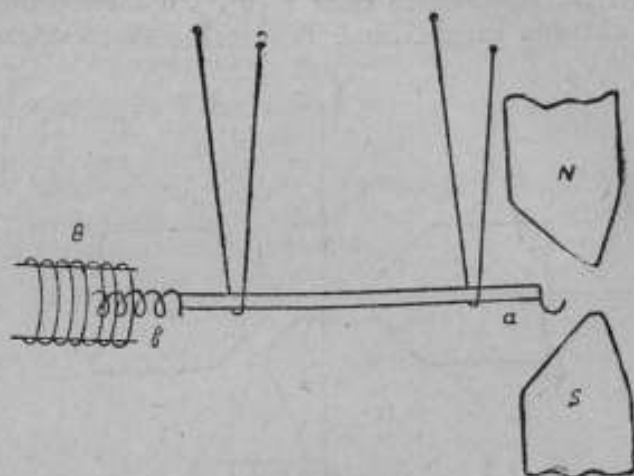


Рис. 3.

Образец, помещенный в чашечку *a*, втягивается полем электромагнита *NS*.

На противоположном конце стержня намотана катушка *a*, которая в свою очередь втягивается катушкой *B*. Подбирая соответствующую силу тока в одной из катушек, когда в другой проходит постоянный по величине ток, можно уравновесить силы притяжения электромагнита и катушки, которые, очевидно, будут пропорциональны силе тока в одной из катушек.

Другим, не менее удачным решением этого же вопроса является увеличение объема пространства, в котором функция *G* имеет постоянное значение. Для этого Кюри [4] предложил оси полюсов электромагнита делать наклонными друг к другу, а в 1932 г. Ферей (Fereday) предложил изготавливать полюса особой формы, так, чтобы вдоль оси этих полюсов величина *G* оставалась постоянной. Теоретический способ решения этого вопроса подробно был изложен в нашей предыдущей работе [1].

ВЫВОДЫ

Теоретический анализ погрешностей метода Гун и Фараден даёт основание сделать следующие заключения относительно условий, которым должен удовлетворять прибор, гарантиру

ющий погрешность измерений не больше заданной величины $\pm \delta$:

1. Колебания силы тока в цепи электромагнита не должны вызывать изменений в напряженности поля более чем $\pm 0,1\%$. Для этой цели материал сердечника должен работать в условиях, близких к насыщению, где производная $\frac{\partial H}{\partial I}$ имеет малое значение. Намагничивающая обмотка электромагнита должна быть так рассчитана, чтобы гарантировать максимально возможную индукцию в полюсных наконечниках.

2. Для прибора, построенного на принципе Гуи, магнитное поле между полюсами электромагнита должно быть по возможности однородным. Степень однородности определяется из уравнения

$$\sqrt{20} \frac{\Delta H}{H} < \delta$$

или, так как

$$\Delta H = \frac{\partial H}{\partial z} \Delta z,$$

то

$$\frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial z} \cong \frac{H}{\sqrt{20}} \frac{\delta}{\Delta z}.$$

Величина Δz представляет амплитуду колебания весов (выраженную в сантиметрах), в пределах которой мы должны иметь поле однородным.

Если положить $\Delta z = \pm 0,2$ см,

то

$$\frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial z} \cong \frac{1}{\sqrt{20} \cdot 0,2} \delta = 1,1 \delta.$$

Если δ принять равной 0,001, то $\frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial z}$ должно быть меньше 0,0011.

Такая степень однородности может быть достигнута только при полюсных наконечниках из однородного материала, имеющих плоско-параллельные поверхности большого диаметра.

3. Для прибора, построенного на методе Фарадея, полюсные наконечники должны иметь форму, обеспечивающую получение неоднородного силового поля, в котором сила притяжения в пространстве, превышающем объем испытуемого образца, имела бы постоянное значение. Такого рода полюса, по опытным данным (Кюри, Вейс) и теоретическим расчетам (Ферей), должны быть или в виде несимметричных конусов или же в форме цилиндров различного диаметра с выпуклой и вогнутой поверхностью (см. Труды ВНИИМ, вып. 1 (43), 1940, стр. 16).

4. Конструкция подвесного устройства, на котором помещается

испытываемый образец, должна обладать одной лишь степенью свободы, чтобы устранить действие поперечных сил.

При пользовании рычажными весами для измерения сил притяжения эта задача не разрешается, поэтому для относительных методов измерения, где не требуется знания абсолютного значения силы, удобнее пользоваться крутильными весами, которые можно устроить так, чтобы они имели только одну степень свободы движения вокруг вертикальной оси, или же воспользоваться методами Вейса-Фуа.

Установление нормальных образцов парамагнитных материалов

Как было указано выше, пирофосфорный марганец ($Mn_2P_2O_7$), хлористый марганец ($MnCl_2$) и фтористый кобальт (CoF_2), принятые на основании предыдущей работы в качестве нормальных образцов магнитной восприимчивости парамагнитных материалов, не представляли собой чистых химических соединений. Вследствие этого величина их магнитной восприимчивости не могла быть использована одновременно как физико-химическая константа, характеризующая их физико-химические свойства. Поэтому Химическая лаборатория ВНИИМ изготовила два новых препарата: окись хрома (Cr_2O_3) и закись-окись марганца (Mn_3O_4) в количестве примерно 100 г каждого.

В Магнитной лаборатории эти препараты испытывались на магнитные свойства. Для обоих препаратов была определена удельная магнитная восприимчивость относительным методом Гуи, путём сравнения с водой, для которой удельная восприимчивость принималась равной $0,720 \cdot 10^{-6}$ CGS p_0 .

Все измерения производились при температуре 19—20°C и удельная восприимчивость вычислялась по формуле

$$\chi = 10^{-6} \cdot 0,72 \frac{p}{p_0} \cdot \frac{m_p}{m}$$

где p — сила притяжения образца, p_0 — сила притяжения воды; m — масса образца, m_0 — масса воды.

При измерениях χ для Mn_3O_4 обнаружилось расхождение в величине магнитной восприимчивости в пределах от 45 до 65 CGS p_0 в зависимости от способа приготовления этого препарата. После нескольких попыток Химическая лаборатория остановилась на методе приготовления из углекислого марганца или из свежееосажденной двуокиси марганца путём прокалывания их при температуре 1300—1400°C. Химический анализ полученного вещества показал, что содержание марганца (72,03%) в пределах точности измерений соответствует химической формуле Mn_3O_4 .

Поэтому из всех имевшихся препаратов Mn_3O_4 , приготовленных Химической лабораторией, пришлось остановиться на по-

следнем, для которого величина магнитной восприимчивости оказалась равной $56,5 CGS\mu_m$.

Расхождения в величине χ по сравнению с данными других авторов (Ведекинд, Фейтис и Вильсон), вероятно, объясняются точно также несоответствием данных препаратов химической формуле Mn_2O_4 , которая зависит от способа приготовления препарата.

Результаты измерений препаратов Cr_2O_3 и Mn_2O_4 представлены в табл. 5

Таблица 5

№ п/п серия	Cr_2O_3					Mn_2O_4				
	p	m	p_0	m_0	$\chi \cdot 10^3$	p	m	p_0	m_0	$\chi \cdot 10^3$
1	0,07495	0,778	0,00870	3,088	24,6	0,27668	4,352	0,00238	2,970	57,1
2	0,07513	0,778	0,00870	3,088	24,7	0,28930	4,500	0,00238	2,970	57,0
3	0,07495	0,778	0,00831	3,087	25,8	0,28910	4,500	0,00238	2,970	56,9
4	0,07513	0,778	0,00831	3,087	25,8	0,28127	4,500	0,00238	2,970	55,4
5	0,07294	0,730	0,00904	3,083	24,5	0,28577	4,500	0,00238	2,970	56,2
6	0,07117	0,722	0,00904	3,083	24,2	0,29194	4,679	0,00238	2,970	56,1
7	0,06172	0,633	0,00904	3,083	23,9	0,28453	4,514	0,00238	2,970	56,7
8	0,07106	0,729	0,00904	3,083	23,9					
9	0,07311	0,756	0,00904	3,083	23,8					
10	0,07008	0,711	0,00904	3,083	24,1	Среднее				56,5
11	0,15792	2,287	0,00668	3,272	24,3					$\pm 0,3$
12	0,11925	1,706	0,00668	3,272	24,5					
13	0,16677	2,522	0,00668	3,272	23,3					
14	0,24461	3,576	0,00668	3,272	24,1					
15	0,16301	2,382	0,00668	3,272	24,1					
16	0,17763	2,468	0,00668	3,272	25,4					
17	0,17566	2,468	0,00668	3,272	25,0					
18	0,14861	2,154	0,00668	3,272	24,3					
19	0,13183	1,819	0,00668	3,272	25,6					
20	0,12931	1,819	0,00668	3,272	25,1					
	Среднее				24,56					
					+ 0,15					

Сравнение этих результатов с результатами других авторов (табл. 1) показывает, что χ для Cr_2O_3 хорошо согласуется с данными Мейера, Хонда и Ведекинда, а для Mn_2O_4 ближе всего совпадает с данными Хонда.

Температурный коэффициент ($\mu = \frac{1}{\chi} \frac{d\chi}{dt}$) препаратов не измерялся, а принят согласно определению Хонда. В пределах температур от 0 до 30° коэффициент μ для Mn_2O_4 может быть принят равным $\mu = -0,0008$, а для Cr_2O_3 — равным нулю.

Указанные препараты, в дополнение к прежним, приняты лабораторией в качестве нормальных образцов магнитной восприимчивости парамагнитных материалов, кроме того значения магнитной восприимчивости для них могут быть использованы как физико-химические константы с указанной выше точностью.

Измерения магнитной восприимчивости препаратов Cr_2O_3 в Mn_2O_4 , изготовленных в Химической лаборатории ВНИИМ

П. И. Хитаровым, производились старшими научными сотрудниками ВНИИМ Н. И. Спиридович и Т. Н. Розе.

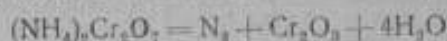
ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОКИСИ ХРОМА (Cr_2O_3)

Для приготовления аморфной окиси хрома Ванино [5] (L. Vanino) рекомендует прокалывать смесь из 50 частей свободного от железа $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ с 10 частями серы, полученную массу обрабатывать водой для удаления K_2SO_4 , осадок отфильтровывать, промывать и высушивать. Шеффер [6] (H. Schöffer) рекомендует растворить 25% тонко измельченного $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в глицерине при температуре водяной бани, а образовавшийся при этом сироп поджечь и далее прокалить до Cr_2O_3 .

Ванно указывает также на приготовление кристаллической окиси хрома по Шиффу [7] (H. Schiff) путём сильного прокалывания тонко измельченной смеси $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Для приготовления окиси хрома Химической лабораторией ВНИИМ были предложены два метода:

1. Химически чистую двуххромовоаммониевую соль подвергали разложению нагреванием в колбе с длинным горлом по реакции



Образовавшийся порошок чайно-зеленого цвета (Cr_2O_3) помещали в платиновый тигель и прокалывали при температуре 900—1000°С и по охлаждении размельчали в порошок.

2. Химически чистую двуххромовокалиевую соль, не содержащую железа, растворяли в воде, подкисляли крепкой серной кислотой и восстанавливали спиртом до интенсивно зеленого цвета. Раствор кипятили до удаления альдегида и разбавляли водой; хром осаждали в виде гидрата окиси хрома аммиаком, взятым с небольшим избытком. Осадок $\text{Cr}(\text{OH})_3$ отфильтровывали, тщательно промывали горячей водой до отрицательной реакции на SO_4 , высушивали и прокалывали в платиновом тигле при температуре 1000—1100°С до постоянного веса. После охлаждения окись хрома размельчали в порошок.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЗАКИСИ — ОКИСИ МАРГАНЦА (Mn_2O_4)

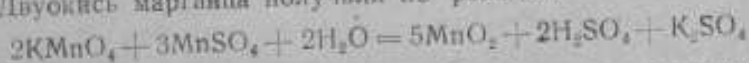
Для приготовления Mn_2O_4 Райт и Цафф [8] (Wright & Zuff) прокалывают углекислый марганец или осажденную двуокись марганца в течение нескольких часов на горелке с дутьем.

Ванино [5] указывает, что при прокаливании на бузеновской горелке образуется соединение с большим содержанием кислорода, чем это соответствует формуле Mn_2O_4 .

С. А. Погодин [9] берёт в качестве исходного продукта хлористый марганец $MnCl_2$, растворяя его в воде и осаждавая углекислый марганец избытком углекислого аммония. Полученный осадок после просушивания имеет розовато-белый цвет. Прокаливание производят в магнетитовом тигле в газовом горне с дутьём при температуре $1000-1100^\circ C$. Полученное вещество бурого, почти чёрного цвета по анализу содержит 73,8% Mn, т. е. больше, чем это соответствует формуле Mn_2O_4 (72,03% Mn). С. А. Погодин объясняет это некоторой неполнотой окисления закиси марганца.

Химическая лаборатория ВНИИМ готовила Mn_2O_4 прокаливанием углекислого марганца, а также свежесозаждённой двуокиси марганца [8]. Углекислый марганец получали осаждением марганца избытком углекислого аммония из растворов химически чистого сернистого или хлористого марганца. Полученный осадок тщательно промывали горячей водой до отрицательной реакции на SO_4^{2-} (или Cl^-), сушили и прокаливали [9].

Двуокись марганца получали по реакции



из химически чистых $KMnO_4$ и $MnSO_4$. Растворы обоих веществ сливали вместе, отстаивали; образующуюся при этом двуокись марганца отфильтровывали и тщательно промывали горячей водой до отрицательной реакции на SO_4^{2-} . Полученную двуокись марганца сушили и прокаливали.

Прокаливание производили в алундовом тигле в высокочастотной печи при температуре $1300-1400^\circ C$. Полученное вещество тёмнокоричневого цвета по анализу содержало 72,16% Mn, что почти точно соответствует формуле Mn_2O_4 .

Опыты показали, что при прокаливании углекислого марганца или двуокиси марганца при более низкой температуре получается продукт с пониженным содержанием марганца.

Марганец во всех случаях определяли по способу Е. И. Денисова [10], который даёт возможность определять большие количества марганца с большой точностью. Титр раствора соли Мара определялся при этом по раствору $KMnO_4$, титр которого был в свою очередь установлен по шавелевонатриевой соли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яновский и Н. И. Спиридонов. Об установлении нормальных образцов магнитной восприимчивости парамагнитных тел. Сборник трудов ВНИИМ, «Магнитные исследования и измерения», 1940, вып. I (43).
2. H. Auer, Die absolute magnetische Suszeptibilität des Wassers und ihre Temperaturabhängigkeit. Annalen der Physik. 1933, 18, s. 593.

3. P. Weiss et G. Foa. Etude de l'aimantation des corps ferromagnétiques au dessus du point de Curie. Journal de Physique. 1911. № 1, p. 274.
4. P. Curie. Propriétés magnétiques des corps à diverses températures. Journal de physique. 1896. № 4, p. 197, 263.
5. Ludwig Vanino. Handbuch der präparativen Chemie. 1921, Bd. 1, s. 681.
6. H. Schöffer. Journ. Pharm. Chim., 5, 27, s. 622.
7. H. Schiff. Ann., 106, 114, 1858.
8. Wright & Zuff. Ber. d. d. chem. Ges. II, 2145 (1878).
9. С. А. Погодин. Журнал „Металлург“. 1935, № 2, стр. 101—110.
10. Е. И. Денисов. Журнал „Заводская лаборатория“. 1936, № 6, стр. 670.

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При оценке метода и результатов измерений с метрологической точки зрения одним из основных является вопрос о погрешностях, которые обуславливаются как самим методом и применяемой аппаратурой, так и всевозможными побочными факторами, влияющими на точность получаемых результатов.

Применительно к испытанию ферромагнитных материалов данному вопросу в литературе не уделялось достаточного внимания и этим в значительной мере объясняется то обстоятельство, что в широкой практике существуют подчас самые превратные представления о точности магнитных измерений. Настоящая статья и имеет целью на основе достаточно богатого опыта Магнитной лаборатории ВНИИМ внести известную ясность в современное положение вопроса о погрешностях при измерении главных магнитных характеристик ферромагнитных материалов — кривых намагничивания и потерь на гистерезис и токи Фуко.

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

При определении магнитных характеристик, кривых намагничивания и потерь на гистерезис и токи Фуко, приходится иметь дело с функциональными зависимостями двух величин.

Как известно, кривые намагничивания представляют зависимость магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H , характер которой в общем случае не известен и строгой математической интерпретации такая зависимость не поддается. Обе величины B и H измеряются с той или иной точностью. Однако эти погрешности не определяют ещё в полной мере погрешности данной функциональной зависимости $B=f(H)$, так как погрешность при определении аргумента H сказывается на определении функции B и это влияние будет различным в зависимости от вида функции $B=f(H)$. Таким образом, помимо погрешности непосредственного измерения индукции B , будет иметь место ещё и погрешность в определении B , обусловленная погрешностью измерения H .

Для определения этой последней погрешности поступим следующим образом. Дифференцируя выражение $B=f(H)$, получим:

$$dB = f'(H) dH.$$

Преобразуя это уравнение, находим:

$$\frac{dB}{B} = f'(H) \frac{H}{B} \frac{dH}{H}. \quad (1)$$

Обозначим $\frac{dB}{B} = E_{\text{ошн}}$, как относительную погрешность в B , обусловленную погрешностью в H , и $\frac{dH}{H} = E_{\text{ош}}$, как относительную погрешность определения H .

Тогда уравнение (1) можно написать в следующем виде:

$$E_{\text{ошн}} = f'(H) \frac{H}{B} E_{\text{ош}}. \quad (2)$$

Функция $f'(H) = \frac{dB}{dH}$ представляет собой дифференциальную проницаемость μ_d испытуемого материала, а $\frac{H}{B} = \frac{1}{\mu}$ — величину, обратную нормальной проницаемости μ , определяемой из основной кривой намагничивания. Подставляя эти выражения в формулу (2), получим:

$$E_{\text{ошн}} = E_{\text{ош}} \frac{\mu_d}{\mu}. \quad (3)$$

Полная относительная погрешность $E_{\text{об}}$ при определении индукции для данной напряженности поля

$$E_{\text{об}} = E_{\text{об}} + E_{\text{ош}} \frac{\mu_d}{\mu}, \quad (4)$$

где $E_{\text{об}}$ — относительная погрешность измерения индукции.

Как следует из выражения (4), погрешность при определении зависимости $B=f(H)$ будет определяться не только погрешностями непосредственных измерений величин B и H , но также и видом функции $B=f(H)$. При одних и тех же погрешностях $E_{\text{об}}$ и $E_{\text{ош}}$, погрешность $E_{\text{об}}$ будет различной для разных точек кривой намагничивания, в зависимости от величины отношения $\frac{\mu_d}{\mu}$ для данной точки.

Для практического использования выражения (4) при подсчете погрешностей определения отдельных точек кривой намагничивания можно основываться на типичных кривых намагничивания испытуемого сорта материала. Пользуясь такими кривыми, можно

заранее построить кривые $\mu = f_1(H)$ или $\mu = f_2(B)$, а также кривые дифференциальной проницаемости $\mu_d = f_3(H)$ или $\mu_d = f_4(B)$, или же, для упрощения расчетов

$$\frac{\mu_d}{\mu} = f_5(H) \quad \text{или} \quad \frac{\mu_d}{\mu} = f_6(B).$$

Приведённые выше выражения для погрешностей применимы не только при определении основной кривой намагничивания, но и других кривых, в частности гистерезисного цикла.

При измерении потерь на гистерезис и токи Фуко мы имеем дело также с функциональной зависимостью двух величин, потерь P_{hf} и максимального значения магнитной индукции B_{max} . Пользуясь приведенными выше рассуждениями, для полной относительной погрешности при определении потерь получим выражение

$$E'_{\text{ср}} = E_{\text{ср}} + E_{\text{об}} \frac{\frac{dP_{hf}}{dB_{max}}}{\frac{P_{hf}}{B_{max}}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{ср}}$ — относительная погрешность измерения потерь;

$E_{\text{об}}$ — относительная погрешность измерения индукции.

Таким образом и в данном случае погрешность при определении потерь будет различной для разных индукций, так как это зависит от вида кривой $P_{hf} = f_7(B_{max})$.

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Для суждения о погрешностях определения основной кривой намагничивания на постоянном токе индукционным (баллистическим) методом рассмотрим этот вопрос применительно к испытанию полосового образца в замкнутой магнитной цепи в пермееметре. При этом будем предполагать, что напряжённость намагничивающего поля измеряется калиброванными катушками с баллистическим гальванометром.

Найдём относительную погрешность определения постоянной баллистического гальванометра. Как известно, баллистическая постоянная C'_g вычисляется по формуле:

$$C'_g = \frac{M \delta I}{\alpha_g},$$

где M — взаимная индуктивность образцовой катушки;

δI — изменение силы тока;

α_g — отклонение гальванометра.

Выражение для наибольшей относительной погрешности определения C_p будет иметь вид:

$$\frac{\Delta C_p}{C_p} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta(\beta I)}{\beta I} + \frac{\Delta a_b}{a_b}$$

Погрешность в M (при условии сравнения катушки с рабочим эталоном ВНИИМ) может быть оценена в 0,1%. Погрешность измерения силы тока показывающим прибором складывается из основной погрешности и погрешности от неправильной установки стрелки прибора на данное деление шкалы во время измерения. Дополнительные погрешности прибора в данном случае не учитываем, считая, что прибор находится в таких условиях, при которых дополнительными погрешностями можно пренебречь по сравнению с основной. Полагаем, что при измерении отклонение прибора будет около половины шкалы и шкала имеет 150 делений. Тогда основная погрешность прибора класса 0,2 составит 0,4%.

Точность установки стрелки на деление шкалы можно оценить в 0,05 деления, что при отклонении в 75 делений составляет 0,07%.

Таким образом, наибольшая относительная погрешность при измерении силы тока может быть порядка 0,47%.

Погрешность в отсчете отклонения гальванометра (при условии, что учитывается поправка на прямолинейную шкалу и наблюдаются два или три отклонения при одних и тех же условиях, а отклонения по шкале не меньше 200 м.м) может быть оценена, на основании опытных данных, в 0,4 м.м. В эту величину входит погрешность самого отсчета отклонения и погрешность, обусловленная гальванометром.

Следовательно,

$$\frac{\Delta a_b}{a_b} = 0,2\%$$

Таким образом, наибольшая относительная погрешность при определении постоянной гальванометра

$$\frac{\Delta C_p}{C_p} = 0,77\%$$

Вероятная же погрешность при этих условиях будет равна

$$E_{\alpha} = \sqrt{0,1^2 + 0,47^2 + 0,2^2} = 0,52\%$$

Магнитная индукция B для основной коммутационной кривой намагничивания вычисляется по формуле

$$B = \frac{C_b \sigma}{2s_0 w_2} \quad (6)$$

где s_0 — сечение образца;

w_2 — число витков измерительной катушки.

Для образца листового материала сечение определяется из выражения

$$s_0 = \frac{m}{lD},$$

где m — масса образца;

l — его длина;

D — плотность материала.

Подставляя выражение для s_0 в формулу (6), находим

$$B = \frac{C_b \sigma l D}{2 m w_2}.$$

Принимая плотность D , как постоянную величину, для наибольшей относительной погрешности B получим выражение

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta C_b}{C_b} + \frac{\Delta \sigma}{\sigma} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta m}{m}.$$

Погрешность измерения l принимаем равной 1 мм. При длине полосы 500 мм

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,2\%.$$

Погрешность измерения массы может быть снижена до очень малой величины, однако в данном случае применение особо точного взвешивания нецелесообразно, имея в виду наличие более значительных погрешностей при измерении других величин. Погрешность эту, если масса имеет величину порядка 100 г, можно принять в 0,1 г, что даёт для

$$\frac{\Delta m}{m} = 0,1\%.$$

Погрешность при определении отклонения гальванометра принимаем, так же как и в случае градуировки гальванометра, равной 0,2%.

Таким образом,

$$\frac{\Delta B}{B} = 0,77 + 0,2 + 0,2 + 0,1 = 1,27\%.$$

Если для погрешности при определении постоянной гальванометра принять, согласно приведенным выше расчётам, вероят-

ную погрешность, равную 0,52%, то для вероятной относительной погрешности определения индукции получим

$$E_{\text{ис}} = \sqrt{0,52^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 0,1^2} = 0,60\%$$

Напряжённость поля H при измерении калиброванной катушкой с баллистическим гальванометром вычисляется по формуле

$$H = \frac{C_b^2}{2s\omega\mu_0}$$

где $s\omega$ — постоянная калиброванной катушки;

μ_0 — проницаемость пустоты.

Имея в виду, что постоянная $s\omega$ определяется при помощи образцового соленоида, погрешность её, на основании опытных данных, может быть принята равной 0,2%.

В соответствии с этим наибольшая относительная погрешность определения H составит

$$\frac{\Delta H}{H} = 0,77 + 0,2 + 0,2 = 1,17\%$$

Вероятная же погрешность будет равна

$$E_{\text{вер}} = \sqrt{0,52^2 + 0,2^2 + 0,2^2} = 0,59\%$$

Для обычных измерений могут быть приняты вероятные погрешности измерения индукции и напряжённости поля.

Техника измерений индукционным методом при определении основной кривой намагничивания заключается в том, что, установив некоторый намагничивающий ток, переключают его направление и в этот момент наблюдают отклонение гальванометра, соединённого с обмоткой для измерения индукции. Далее, переключив гальванометр на калиброванную катушку для измерения напряжённости поля, устанавливают ту же силу тока, что и при измерении индукции, и наблюдают отклонение гальванометра при переключении тока.

При этих измерениях вполне вероятно, что вследствие вариаций прибора и погрешности отсчёта по нему, действительное значение силы тока в обоих случаях будет разным, а это вызовет дополнительную погрешность при определении кривой намагничивания. Принимая прямолинейную зависимость между напряжённостью внутреннего поля и силой тока в намагничивающей катушке пермеаметра (что для весьма малых изменений тока, которые в данном случае возможны, вполне допустимо), получим, что к ранее вычисленным погрешностям определения H прибавится ещё погрешность, обусловленная воспроизведением по стрелочному прибору той силы тока, какая была установлена

при измерении B . Эту погрешность для прибора класса 0,2 можно принять равной 0,27%, считая вариацию в 0,2% и погрешность установки стрелки прибора на деление в 0,07%.

Основываясь на приведенных выше соображениях о погрешности определения функциональной зависимости (какой является кривая намагничивания), полную относительную погрешность $E'_{об}$ определения индукции для заданной напряженности поля следует вычислять в соответствии с выражением (4) по следующей формуле:

$$E'_{об} = E_{об} + (E_{он} + E'_{он})^2 \mu^2$$

где $E_{об}$ — вероятная относительная погрешность непосредственного измерения индукции;

$E_{он}$ — вероятная относительная погрешность непосредственного измерения напряженности поля;

$E'_{он}$ — относительная погрешность при измерении напряженности поля, обусловленная неточностью воспроизведения по стрелочному прибору той силы намагничивающего тока, при которой измерялась индукция.

В табл. 1 для примера приведены результаты подсчета по-

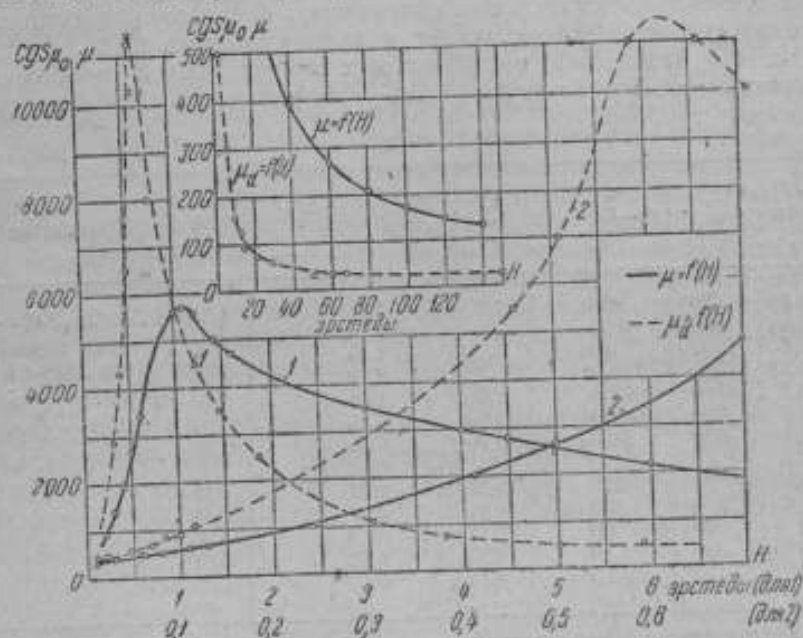


Рис. 1. Кривые нормальной и дифференциальной проницаемости листов трансформаторной стали при намагничивании постоянным полем.

грешностей при определении основной кривой намагничивания листов трансформаторной стали. При вычислении нормальной и дифференциальной проницаемости пользовались основной кривой намагничивания, полученной на одном из образцов трансформаторной стали Верх-Исетского завода. Кривые $\mu = f_1(H)$ и $\mu_d = f_2(H)$ для этого образца изображены на рис. 1.

Необходимо отметить, что при этих подсчётах предполагалось, что погрешности отсчёта отклонений гальванометра сохраняют одну и ту же величину при определении всех точек кривой намагничивания. Практически это не во всех случаях может быть обеспечено; особенно трудно получить достаточно большие отклонения при измерении малых напряжённостей поля и относительные погрешности отсчёта отклонений в этих случаях могут превышать принятые нами величины.

Приведённые в табл. 1 данные показывают:

1. Полная погрешность при определении индукции довольно существенно зависит от того, в какой части кривой намагничивания определится индукция и, как следовало ожидать, наибольшие погрешности относятся к областям максимальных значений дифференциальной и нормальной проницаемости. Наименьшие погрешности получаются в области более сильных полей.

2. По абсолютному значению наименьшая погрешность, даже при достаточно тщательных измерениях, которые предполагались в наших подсчётах, составляет величину порядка 0,7%.

3. Из отдельных составляющих погрешностей наибольшее влияние оказывает погрешность измерения силы тока по стрелочному прибору.

Таблица 1

H Эрсте- ды	μ CGS ₉₀	μ_d CGS ₉₀	$\frac{\mu_d}{\mu}$	$\frac{\mu_d(E_{0H} + E_{0H})}{\mu}$ %	E_{0H} %	Примечание
0,1	590	940	1,5	1,38	1,28	Для E_{0H} принята величина 0,27%; $E_{0H} = 0,590\%$; $E_{0H} = 0,600\%$.
0,2	940	1800	1,9	1,63	2,23	
0,5	2640	6320	2,5	2,15	2,75	
0,68	4300	11490	2,7	2,32	2,92	
0,8	4800	7500	1,6	1,38	1,58	
1,0	5600	5900	1,0	0,86	1,36	
1,5	4840	3320	0,7	0,60	1,20	
2,0	4200	2120	0,5	0,43	1,03	
4,0	2940	720	0,25	0,22	0,82	
6,0	2160	440	0,20	0,17	0,77	
25	625	66	0,11	0,10	0,70	
50	315	40	0,13	0,11	0,71	
100	170	25	0,15	0,13	0,73	

Повышение точности измерений может быть достигнуто путём многократных повторных измерений отдельных точек кривой и измерением силы тока при помощи компенсатора.

Помимо рассмотренных погрешностей, могут иметь место и систематические погрешности, которые должны быть учтены при измерениях. Укажем некоторые из них.

При испытании образцов, особенно в относительно больших полях, не исключена возможность нагревания образца. При изменении температуры образца, как известно, изменяется его магнитная проницаемость. Температурный коэффициент магнитной проницаемости имеет разную величину для различных материалов, и, кроме того, он меняется в зависимости от индукции образца. Так, например, для трансформаторной стали Верх-Исетского завода (по данным измерения Магнитной лаборатории ВНИИМ) температурный коэффициент в интервале температур от $+20^\circ$ до $+80^\circ$ С изменяется в зависимости от индукции в пределах от 0,0002 до 0,0008. Таким образом, если принять температурный коэффициент равным 0,0005, то при изменении температуры образца на 10° С можно ожидать изменения индукции на 0,5%.

Повышение температуры в катушке пермеметра вызывает изменение сопротивления обмотки, служащей для измерения индукции, а также сопротивления калиброванной катушки, при помощи которой измеряется напряжённость поля. Это обстоятельство может повлечь за собой изменение постоянной гальванометра, не учитываемое при его градуировке. Погрешность, обусловленную этим фактором, при измерении индукции трудно свести к минимуму, включая последовательно с гальванометром, как это всегда и следует делать, добавочное сопротивление из марганца. Кроме того, сопротивление этой обмотки обычно незначительно по сравнению с сопротивлением гальванометра. Влияние же изменения сопротивления калиброванной катушки на величину постоянной гальванометра может оказаться более заметным, чем при измерении индукции. Это объясняется тем, что сопротивление обмотки такой катушки, если она намотана из медной проволоки, имеет, как правило, довольно большую величину и включение достаточно большого добавочного сопротивления не всегда возможно и целесообразно с точки зрения уменьшения чувствительности гальванометра и изменения режима его работы.

При измерении напряжённости поля возможна также погрешность от неправильной установки калиброванной катушки по отношению к образцу. Так как измерению подлежит тангенциальная составляющая напряжённости поля H_t , то погрешность от неправильной установки катушки

$$\frac{H_t \cos \alpha - H_t}{H_t},$$

где α — угол между осями катушки и образца.

Если принять, что угол α равен $3^\circ - 4^\circ$, то указанная погрешность составит примерно $0,2\%$.

Погрешности определения основной кривой намагничивания на переменном токе индукционным методом

Рассмотрим погрешности измерения максимального значения магнитной индукции B_{\max} . Как известно,

$$B_{\max} = \frac{E_{\text{med}}}{4fws},$$

где E_{med} — среднее значение э. д. с., индуцированной в обмотке охватывающей испытуемый образец;

f — частота тока;

w — число витков обмотки;

s — сечение образца.

Наибольшая относительная погрешность при определении B_{\max}

$$\frac{\Delta B_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\Delta E_{\text{med}}}{E_{\text{med}}} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta s}{s}. \quad (7)$$

Положим, что E_{med} измеряется магнитоэлектрическим прибором с вибрационным выпрямителем. В этом случае погрешность ΔE_{med} будет складываться из основной погрешности выпрямителя и погрешности магнитоэлектрического прибора.

Основная погрешность вибрационного выпрямителя зависит от конструкции, тщательности изготовления и регулировки выпрямителя и определяется несвоевременным замыканием и размыканием контактов. Для идеального выпрямителя отношение времени, в течение которого контакты выпрямителя замкнуты, ко времени, когда контакты разомкнуты, должно равняться единице, так как только в этом случае среднее значение э. д. с. будет измерено правильно. В данном случае имеется в виду, что кривая измеряемой э. д. с. симметрична относительно оси абсцисс.

Для выполнения указанного условия колебания язычка выпрямителя должны точно следовать за изменением направления тока возбуждения выпрямителя, а замыкание и размыкание контактов должны чередоваться точно через 180° . Отступление от этого условия и определяет погрешность выпрямителя. Полагая, что замыкание и размыкание контактов запаздывает на время

$$\Delta t = \frac{\Delta\psi}{\omega},$$

где $\Delta\psi$ — угол запаздывания;

ω — угловая частота тока,

получим для относительной погрешности выражение

$$\gamma_{0\%} = \left[\frac{\cos(\delta + \Delta\psi)}{\cos \delta} - 1 \right] 100\%$$

где δ — угол между векторами тока возбуждения выпрямителя и измеряемой э. д. с.

Для $\delta = 0$, т. е. когда измеряется полное среднее значение э. д. с.,

$$\gamma_{02} = (\cos \Delta\psi - 1) \cdot 100\%.$$

Из этой формулы можно найти, что при $\Delta\psi$, не превышающем $\pm 5^\circ$ (а это практически вполне осуществимо), погрешность будет иметь величину порядка 0,4%, которая и является основной погрешностью выпрямителя.

Если в качестве измерителя применён прибор класса 0,2 и при измерении стрелка отклоняется примерно на половину шкалы, то относительную погрешность, обусловленную измерителем, можно принять равной 0,5%, считая, что погрешность отсчёта равна 0,1%.

Тогда

$$\frac{\Delta E_{\text{мед}}}{E_{\text{мед}}} = 0,9\%.$$

Погрешность при измерении частоты вибрационным частотомером или при помощи магнитоэлектрического прибора и генератора, сочленённого с агрегатом, питающим измерительную установку, может быть оценена в 0,5%.

При определении сечения образца плотность материала принимается равной стандартной величине в зависимости от сорта материала, и поэтому погрешность определения сечения будет складываться из погрешности измерения массы и длины образца. Полагая, что масса образца не меньше 100 г, погрешность её определения можно принять равной 0,1 г. Длина образца может быть различной и связана с общими размерами и формой магнитной цепи. Для наших подсчётов погрешность в измерении длины можно принять равной 0,2%. В этом случае

$$\frac{\Delta s}{s} = 0,3\%.$$

Подставляя численные значения отдельных погрешностей в формулу (7), получим

$$\frac{\Delta B_{\text{max}}}{B_{\text{max}}} = 1,7\%.$$

Вероятная погрешность измерения индукции

$$E_{\text{об}} = \sqrt{0,9^2 + 0,5^2 + 0,3^2} = 1,07\%.$$

Напряженность поля, соответствующая измеренной индукции, при определении кривых намагничивания на переменном токе в большинстве случаев вычисляется по намагничивающему току

и постоянной намагничивающей обмотки. При испытании кольцевых образцов погрешность в определении напряжённости поля зависит в великом от погрешности измерения силы тока, если не учитывать неравномерность распределения индукции по сечению образца. В других случаях, когда испытываются образцы не кольцевой формы, вопрос о погрешности определения напряжённости поля может быть решён лишь применительно к данному конкретному случаю.

Погрешность измерения действующего значения силы тока показывающим прибором может быть оценена в 0,5%.

Подсчитаем теперь полную относительную погрешность определения индукции $E_{об}'$ по формуле (4), воспользовавшись кривыми магнитной проницаемости на рис. 1 для образца трансформаторной стали.

Для напряжённости поля (действующее значение), соответствующей наибольшему отношению $\frac{B_d}{\mu}$, погрешность $E_{об}' = 2,4\%$, т. е. эта погрешность получается примерно такого же порядка, что и при определении кривой намагничивания индукционным методом на постоянном токе.

Несколько большую погрешность следует ожидать при определении кривой намагничивания $B_{max} = f(H_{max})$, когда требуется измерять максимальные значения намагничивающего тока.

Наряду с рассмотренными погрешностями, будут иметь место и систематические погрешности, специфические для индукционного метода на переменном токе, когда э. д. с. измеряется прибором с конечной величиной сопротивления. Величина относительной погрешности, обусловленная этим фактором, может быть представлена выражением

$$\gamma_{от} = \frac{U - E}{E} = - \frac{1}{1 + \frac{r_2}{r_3}}$$

где U — измеренная э. д. с.;

E — действительная величина э. д. с.;

r_3 — сопротивление измерительного прибора;

r_2 — сопротивление измерительной обмотки на испытуемом образце.

При этом предполагается, что падение напряжения в измерительной обмотке чисто активное.

Сопротивление r_2 обычно мало, составляя доли ома, сопротивление же r_3 определяется системой прибора и его пределом измерения. Если, например, в качестве измерителя применяется магнитоэлектрический прибор с вибрационным выпрямителем, то указанная погрешность может иметь заметную величину лишь при измерении очень малых напряжений. Так, при измерении

напряжения порядка 1 мв магнитоэлектрическим микроамперметром, имеющим сопротивление 100 ом, через вибрационный выпрямитель, погрешность $\gamma_{0\alpha}$ будет равна 1%, если принять сопротивление измерительной обмотки равным 1 ому.

Для определения напряжённости намагничивающего поля необходимо знать силу тока в намагничивающей цепи в режиме холостого хода, т. е. когда измерительная обмотка разомкнута. Если же э.д.с. измеряется прибором с конечным сопротивлением, то ток, измеренный в этом случае, будет отличаться от тока холостого хода при разомкнутой измерительной обмотке. Относительную погрешность, обусловленную этим фактором, можно представить следующим выражением:

$$\gamma_{0\alpha} = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \left(1 + \frac{P_2}{P_{Hf}} \right)^2} - 1 \right],$$

где P_2 — мощность, расходуемая в измерительном приборе;

P_{Hf} — потери на гистерезис и токи Фуко в испытуемом образце;

$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_r}{I_a}$, если I_a — активная составляющая намагничивающего тока, обусловленная потерями на гистерезис и токи Фуко;

I_r — реактивная составляющая тока.

Как видим, погрешность $\gamma_{0\alpha}$ зависит от отношения мощности, расходуемой в приборе, к полным потерям на гистерезис и токи Фуко в испытуемом образце, а также и от $\operatorname{tg} \alpha$, величина которого при определённом I_r также зависит от потерь в образце.

Подбирая соответственным образом массу испытуемого образца, применительно к имеющейся измерительной аппаратуре, нетрудно свести указанную погрешность к исчезающе малой величине.

Погрешности определения потерь на гистерезис и токи Фуко ваттметровым методом на приборе Эпштейна

Потери на гистерезис и токи Фуко, измеренные ваттметровым методом, вычисляются по формуле

$$P_{Hf} = P \frac{w_1}{w_2} - \frac{U_2^2}{r_2},$$

где P — отсчёт по ваттметру;

w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток прибора Эпштейна;

U_2 — напряжение на вторичной обмотке; $r'_2 = \frac{r_v + r_w}{r_v + r_w}$, если r_v и r_w — сопротивления вольтметра и параллельной обмотки ваттметра.

Относительная погрешность при измерении потерь выражается формулой

$$\frac{\Delta P_{hf}}{P_{hf}} = \frac{\frac{\omega_1 \Delta P}{\omega_2} + \frac{2U_2 \Delta U_2}{r'_2}}{P \frac{\omega_1}{\omega_2} - \frac{U_2^2}{r'_2}} = \frac{\frac{\Delta P}{P} + \frac{2U_2^2 \Delta U_2}{U_2 r'_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} P}}{1 - \frac{U_2^2}{P \frac{\omega_1}{\omega_2} r'_2}}$$

Обозначив

$$\frac{U_2^2}{P \frac{\omega_1}{\omega_2} r'_2} = A$$

получим

$$\frac{\Delta P_{hf}}{P_{hf}} = \frac{\frac{\Delta P}{P} + 2A \frac{\Delta U_2}{U_2}}{1 - A}$$

Величина A , как это нетрудно видеть, зависит от сопротивления измерительных приборов r'_2 , напряжения U_2 , сорта испытуемой стали и той индукции, при которой измеряются потери P .

Вероятная погрешность измерения потерь

$$E_{\text{оп}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 \left(\frac{1}{1-A}\right)^2 + \left(\frac{2A}{1-A}\right)^2 \left(\frac{\Delta U_2}{U_2}\right)^2}$$

В качестве численного примера вычислим погрешность $E_{\text{оп}}$ при испытании трансформаторной стали, имеющей потери $1,3 \frac{\text{вт}}{\text{кг}}$ при индукции 10 кгс и $3,1 \frac{\text{вт}}{\text{кг}}$ при 15 кгс и частоте 50 гц . Подсчёты производились для индукций $4, 10$ и 15 кгс . Сопротивление r'_2 принято соответственно равным: $950, 1900, 1700 \text{ ом}$ для вольтметров и ваттметров, которые обычно применяются в Магнитной лаборатории ВНИИМ при измерениях на приборе Эшштейна.

Погрешность $\frac{\Delta P}{P}$ для электродинамического ваттметра принималась равной $0,63\%$, считая $0,5\%$ основную приведенную погрешность и $0,13\%$ — погрешность от установки стрелки на данное целое деление. При этом предполагается, что отклонение

стрелки ваттметра равно 75 делениям; точность установки стрелки на определенное деление шкалы принята в 0,1 деления.

Погрешность в измерении напряжения, $\frac{\Delta U_2}{U_2}$, электродинамическим вольтметром принята равной также 0,63% при тех же предположениях, что и для ваттметра.

В этом случае погрешность E_{op} будет равна: для индукции 4 кгс — 1,1%, для 10 кгс — 0,9% и 15 кгс — 0,94%. Для дальнейших подсчетов эту погрешность, как мало изменяющуюся, можно принять постоянной и равной 1%.

Погрешность измерения максимального значения индукции B_{max} при которой измеряются потери, вычисляется по формуле (7).

Применительно к прибору Эпштейна погрешность эта может быть несколько снижена за счёт более точного измерения сечения образца. Однако это уменьшение незначительное и в дальнейших расчетах для E_{op} принята величина 1,07%.

Полная относительная погрешность функциональной зависимости $P_{lf} = f(B_{max})$ выражается формулой (5).

В табл. 2 для примера приведены результаты подсчёта погрешностей E_{op} при измерении потерь в диапазоне индукций от 4 до 15 кгс для одного из образцов трансформаторной стали Верх-Исетского завода.

Таблица 2

Индукция B_{max} гауссы	P_{lf} ватты	$\frac{P_{lf}}{B_{max}}$	$\frac{dP_{lf}}{dB_{max}}$	$E_{об}$ %	$\frac{\frac{dP_{lf}}{dB_{max}}}{\frac{P_{lf}}{B_{max}}}$	E'_{op} %	Примечание
4000	2,8	0,0007	0,0010	1,5	1,5	2,5	Для погрешности E_{op} принята величина, равная 1%.
6000	5,5	0,0009	0,0015	1,7	1,7	2,7	
8000	9,1	0,0012	0,0020	1,8	1,8	2,8	
10000	13,6	0,0014	0,0028	2,1	2,1	3,1	
12000	19,3	0,0015	0,0032	2,1	2,1	3,1	
14000	26,9	0,0019	0,0040	2,2	2,2	3,2	
15000	31,7	0,0021	0,0062	3,2	3,2	4,2	

Проведённый анализ погрешностей при измерении потерь ваттметровым методом показывает:

1. Полная относительная погрешность определения потерь, как это и следовало ожидать, растёт с увеличением индукции, т. е. по мере увеличения крутизны кривой $P_{lf} = f(B_{max})$.

2. По абсолютной величине погрешность может достигать 2—4% в интервале тех индукций, при которых обычно производятся испытания листовой электротехнической стали.

3. Из составляющих общей погрешности большее значение имеет погрешность, обусловленная измерением индукции

$$\left(E_{\text{об}} \frac{\frac{dP_{\text{вт}}}{dB_{\text{max}}}}{\frac{P_{\text{вт}}}{B_{\text{max}}}} \right)$$

что в основном определяется погрешностью измерения среднего значения напряжения.

При вычислении погрешностей предполагалось, что мощность измеряется специальным ваттметром для измерений в цепях с малым коэффициентом мощности, обеспечивающим отклонение стрелки не меньше, чем на половину шкалы. Применение обычных ваттметров нельзя признать допустимым, так как в этом случае погрешность может сильно увеличиться.

Повышение точности результатов измерения (по сравнению с приведенными выше данными) ваттметровым методом в приборе Эпштейна возможно лишь за счёт многократных измерений потерь при одних и тех же условиях.

Из систематических погрешностей, которые при данных измерениях могут иметь существенное значение, прежде всего следует отметить погрешность, обусловленную тем, что напряжение во вторичной обмотке, измеряемое вольтметром, зависит не только от величины потока в испытуемом образце, но также и от потока в воздушном зазоре между образцом и измерительной обмоткой. Поправка, которую при этом приходится вводить, получила название поправки на поток в воздухе. Как известно, она растёт с увеличением индукции и при индукциях уже порядка 13 кгс пренебрегать ею нельзя.

Помимо прямой погрешности в определении индукции, получается при этом заметная погрешность и в определении потерь. Так, например, при испытании трансформаторной стали с потерями порядка $3 \frac{\text{вт}}{\text{кг}}$ при 15 кгс и 50 гц, поправка на поток в воздухе при 15 кгс составляет порядка 70 гс, т. е. 0,47%. Погрешность же в определении потерь, обусловленная недоучётом этой поправки, составит 1,4%.

Далее необходимо отметить погрешность от искажения формы кривой напряжения, подводимого к намагничивающей обмотке прибора Эпштейна. Отступление от синусоидальной кривой вызывает преувеличение потерь на токи Фуко. В обычных принятых условиях испытания на приборе Эпштейна отклонения от синусоидальной кривой становятся заметными при индукциях выше 10 кгс. К примеру, при испытаниях трансформаторной стали коэффициент формы кривой в редких случаях превышает величину 1,16—1,17 при индукции 15 кгс и частоте 50 гц. По-

грешность в величине общих потерь в образце, обусловленная этим явлением, может достигать 1—2%. Соответствующая поправка, как известно, легко может быть учтена.

Известное влияние на точность измерения потерь может оказать температура образца, если она заметно отличается от нормальной. Повышение температуры образца во время его испытания вызывает увеличение электрического сопротивления материала и, следовательно, уменьшение потерь на токи Фуко. Так, например, для образца трансформаторной стали, температурный коэффициент сопротивления которого равен 0,00075, уменьшение полных потерь при индукции 10 кгс при повышении температуры на 10°С составляет порядка 0,2%, имея в виду, что потери на токи Фуко составляют примерно 15% от общих потерь.

При испытании образцов динамной стали температурный коэффициент сопротивления которой в три раза больше, чем у трансформаторной стали, повышение температуры на 10°С вызовет уже уменьшение потерь при той же индукции примерно на 1%, так как у динамной стали потери на токи Фуко составляют примерно 35% от общих потерь. Таким образом, в известных случаях поправка на температуру при измерении потерь должна учитываться.

Следует также обратить внимание на влияние магнитных контактов в местах стыка пакетов в приборе Эпштейна. Неточное соблюдение размеров полос при их нарезке и неаккуратная сборка пакетов приводят к тому, что магнитные контакты в стыках пакетов оказываются неудовлетворительными.

Это обстоятельство сказывается на результатах измерения потерь, и для получения более или менее воспроизводимых результатов следует руководствоваться при зажимании верхних и боковых зажимных устройств в приборе Эпштейна показаниями амперметра, включенного в намагничивающую цепь. Зажимать образцы нужно до тех пор, пока не будет достигнут минимальный намагничивающий ток. Вместе с тем степень зажатия не должна быть сильной, так как в противном случае механические напряжения в материале могут ухудшить магнитные свойства образца.

Опыт показывает, что при соблюдении указанных выше предосторожностей повторные измерения, когда образцы вновь закладываются в прибор Эпштейна, дают результаты, воспроизводимые с погрешностью порядка 1—2%, которая, как это следует из ранее проведенного анализа погрешностей, не превосходит возможных погрешностей измерения.

К. П. ШИФОКОВ

О ПОВЕРКЕ ПОТЕНЦИОМЕТРА ПО ДИССЕЛЬГОРСТУ

Одним из самых точных потенциометров для измерения малых электродвижущих сил является потенциометр по Диссельгорсту (изготавливавшийся фирмой O. Wolff), высокие качества которого в значительной степени обусловлены следующими особенностями:

1. В цепи гальванометра и измеряемой электродвижущей силы отсутствуют трущиеся контакты, вследствие чего термоэлектродвижущие силы, возникающие при перемещении щёток по контактам, не вызывают существенной погрешности. С этой же целью в цепи измеряемой э. д. с. применены чисто медные зажимы. Для исключения остаточных термоэлектродвижущих сил предусмотрен особый масломполненный переключатель.

2. Потенциометр обладает малым сопротивлением цепи гальванометра (около 15Ω), что позволяет получить достаточно высокую чувствительность к напряжению.

3. Сопротивление цепи гальванометра при перестановке рычагов декад остаётся практически неизменным, вследствие чего при отсутствии полной компенсации отклонение гальванометра пропорционально нескомпенсированной части измеряемой э. д. с. Это свойство позволяет в ряде случаев значительно ускорить измерения, отсчитывая последние значащие цифры по отклонению гальванометра.

4. Потенциометр имеет четыре предела измерения, соответствующие значениям рабочего тока $0,1$; $0,01$; $0,001$ и $0,0001$ А, что позволяет измерять электродвижущие силы в пределах до 1 ; $0,1$; $0,01$ и $0,001$ В, делая этот потенциометр в достаточной степени универсальным.

Наиболее полное описание потенциометра и его теория даны самим Диссельгорстом [1], который предложил простые и остроумные приёмы его проверки. Однако некоторые вопросы, возникающие при проверке и пользовании её результатами для практических измерений, остаются невыясненными. Не дано на них ответа и в последующих описаниях потенциометра, например, у М. М. Попова [2] и В. И. Кротовой [3]. Поэтому автор считает полезным изложить свои соображения по поводу проверки потенциометров этого типа, позволяющие оценить правильность получаемых с его помощью результатов измерения.

I. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРА

Принципиальная схема установки с потенциометром Диссельгорста показана на рис. 1. Установка состоит из собственно потенциометра *ПД*, дополнительного устройства *ДУ* для контроля рабочего тока по нормальному элементу *НЭ*, маслонаполненного переключателя *МП* и гальванометра *Г*. Питание осуществляется от батареи *Б* через регулировочный реостат или магазин *Р*.

Потенциометр *ПД* состоит из 5 основных декад *I, II, III, IV* и *V* и 5 замещающих декад *I', II', III', IV'* и *V'*. Каждая пара

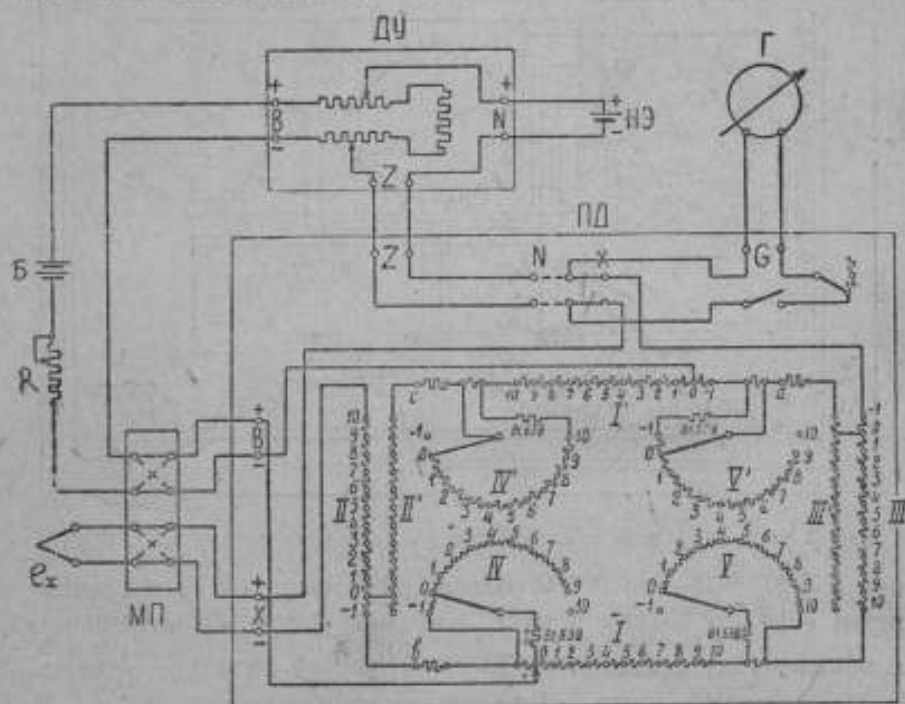


Рис. 1. Электрическая схема установки с потенциометром по Диссельгорсту фирмы O. Wolff.

декад, состоящая из основной и соответствующей ей замещающей, выполнена в виде двойной декады, со щётками на общей рукоятке. Сумма введённых в цепь сопротивлений основной и замещающей декад всегда остаётся постоянной. Питание подводится к щёткам декад *I* и *I'*, где ток разветвляется на две ветви: „левую“, содержащую декаду *II*, и „правую“, в которую входит декада *III*. Декады *I* и *I'* составлены из одноомных катушек, катушки декад *II, II', III* и *III'* имеют по 0,11 Ω , а измене-

ние сопротивления декад IV , IV' , V и V' при перемещении щётки на соседний контакт составляет $0,0011 \Omega$.

Декады IV , IV' , V и V' выполнены по Уайту и имеют сопротивление при нулевых положениях щёток: декады IV и V' — по $0,989 \Omega$, декады IV' и V — по $0,9989 \Omega$. Сопротивление „левой“ ветви при помощи сопротивлений $c = 85,69 \Omega$ и $b = 0,11089 \Omega$ доведено до 99Ω , а „правой“ ветви путём включения сопротивле-

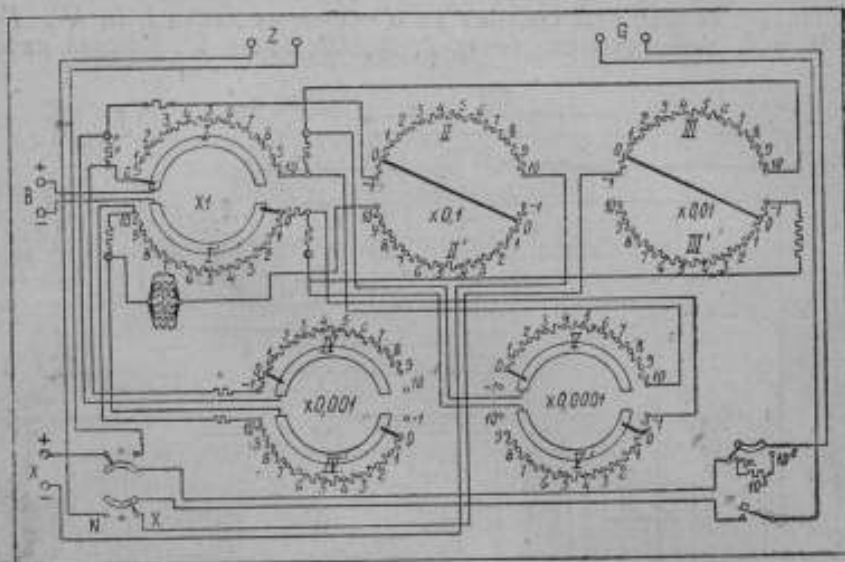


Рис. 2. Монтажная схема потенциометра по Диссельгорсту фирмы O. Wolff

ния $d = 975,8 \Omega$ — до 990Ω . Благодаря этому ток I_{II} в „левой“ ветви в 10 раз больше тока I_{III} „правой“ ветви. По отношению к общему току I ток I_{II} составляет $\frac{10}{11}$ частей, а ток $I_{III} = \frac{1}{11}$ часть.

Падение напряжения, действующее между зажимами $+X \dots -X$, равно разности падений напряжения, создаваемых токами I_{II} и I_{III} в „левой“ и „правой“ ветвях потенциометра. Сопротивление b отрегулировано так, чтобы при положении всех рычагов на 0 они компенсировали друг друга.

Все декады (кроме первой в приборах более позднего выпуска) снабжены контактами — 1, которые могут быть использованы для упрощенной проверки потенциометра.

Монтажная схема потенциометра фирмы O. Wolff изображена на рис. 2.

Дополнительное устройство $ДУ$ предназначено для контроля рабочего тока I по нормальному элементу. Полная схема его изображена на рис. 3. Оно состоит из сопротивления 10180Ω

и двух декад 12×1 и $10 \times 0,1 \Omega$. Последовательно включено сопротивление 7Ω , так что все сопротивление составляет 10200Ω . Концы его подведены к переключателю шунтов, с помощью которого можно устанавливать рабочий ток в $0,1, 0,01, 0,001$ и $0,0001$ А. Дополнительное устройство снабжено зажимами B, N и Z , назначение которых видно из схемы на рис. 1.

Маслонаполненный переключатель MII представляет собой два спаренных двухполюсных переключателя, щётки и контакты которых погружены в масляную ванну для предотвращения возникновения термоэлектродвижущих сил.

2. ВЫВОД ФОРМУЛЫ ДЛЯ КОМПЕНСИРОВАННОЙ НА ПОТЕНЦИОМЕТРЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Показание потенциометра равно значению компенсированной электродвижущей силы при нулевой погрешности потенциометра. Как уже сказано, компенсационное напряжение между зажимами $+X \dots -X$ равно разности падений напряжения, создаваемых токами I_{II} и I_{III} в «левой» и «правой» ветвях потенциометра. Полагая все элементы прибора равными их номиналам, можно составить выражение для показания потенциометра $e_{эп}$:

$$e_{эп} = \frac{10}{11} I [x_1 + b + 0,11(x_2 + 1) + 0,0011x_3 + 0,989] - \frac{1}{11} I [10 - x_4 + 0,11(10 - x_5) + 0,9989 - 0,0011x_6] \quad (1)$$

Здесь x_1, x_2, \dots, x_6 — номера контактов декад I, II, \dots, V , на которых находятся щётки, $b = 0,11089 \Omega$ и $0,989$ — сопротивление декады IV , а $0,9989$ — сопротивление декады V при нулевых положениях их щёток, или «нулевые» сопротивления этих декад.

Подставляя значение b и раскрывая скобки, можно получить

$$e_{эп} = I (x_1 + 0,1x_2 + 0,01x_3 + 0,001x_4 + 0,0001x_5). \quad (2)$$

Показание потенциометра отличается, однако, от действительного значения измеряемой э.д.с. вследствие того, что сопро-

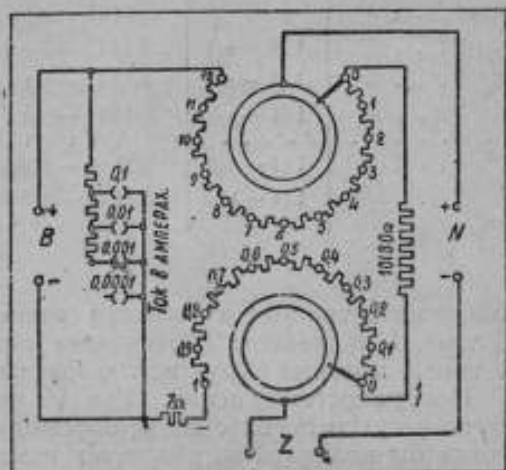


Рис. 3. Схема дополнительного устройства D к потенциометру по Диссальгору.

Катушки между контактами	Д е к а д ы			„Нулевое“
	I	II	III	декада IV
-1 . . . 0	—	0,11 (1 - β_0)	0,11 (1 - γ_0)	0,989 - ω_1
0 . . . 1	1 (1 - α_1)	0,11 (1 - β_1)	0,11 (1 - γ_1)	
1 . . . 2	1 (1 - α_2)	0,11 (1 - β_2)	0,11 (1 - γ_2)	
2 . . . 3	1 (1 - α_3)	0,11 (1 - β_3)	0,11 (1 - γ_3)	
...	
8 . . . 9	1 (1 - α_9)	0,11 (1 - β_9)	0,11 (1 - γ_9)	
9 . . . 10	1 (1 - α_{10})	0,11 (1 - β_{10})	0,11 (1 - γ_{10})	

тивления и токи не в точности равны номинальным значениям. В табл. 1 приведены обозначения погрешностей сопротивлений и токов, которые будут использованы в дальнейших выкладках.

Погрешностями декад IV и V можно пренебречь, так как легко выполнить их с погрешностями, меньшими тех, которые могли бы повлиять на результат измерения.

Если вместо величин, входящих в выражение (1), подставить их значения с погрешностями, то можно определить действительное значение измеряемой электродвижущей силы e_{x_n} , так как при компенсации она равна напряжению на зажимах $+X^* \dots -X^*$.

$$\begin{aligned}
 e_{x_n} = & \frac{10}{11} I \left(1 + \frac{1}{11} \varepsilon \right) (1 - \beta) \left(x_1 - \sum_1^{x_1} z_1 + 0,11 x_2 - 0,11 \sum_0^{x_2} \beta_i + \right. \\
 & \left. + 0,0011 x_4 + 1,20989 - \omega_1 - \omega_3 \right) - \frac{1}{11} I \left(1 - \frac{10}{11} \varepsilon \right) (1 - \beta) \left(-x_1 - \right. \\
 & \left. - \sum_{x_1+1}^{10} x_i - 0,11 x_3 - 0,11 \sum_{x_3+1}^{10} \gamma_i + 0,0011 x_6 + 12,0989 - \omega_2 \right) \quad (3)
 \end{aligned}$$

Это выражение, если раскрыть скобки и пренебречь членами, содержащими произведения погрешностей, можно привести к виду

сопротивление	b	f	I_H	I_M
декада V				
$0,9989 - \omega_2$	$0,11089 - \omega_1$	$I(1-z)$	$\frac{10}{11} I \left(1 + \frac{1}{11} z\right)$	$\frac{1}{11} I \left(1 - \frac{10}{11} z\right)$

Погрешность токов I_H и I_M определяется из выражений

$$\frac{I_M}{I_H} = \frac{1}{10}(1-z) \text{ и } I_H + I_M = I.$$

$$e_{x_2} = I \left\{ \left[x_1 + 0,1x_2 + 0,01x_3 + 0,001x_4 + 0,0001x_5 - \frac{10}{11} \sum_1^{x_1} \alpha_i + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{11} \sum_{x_1+1}^{10} \alpha_i - 0,1 \sum_0^{x_2} \beta_i + 0,01 \sum_{x_3+1}^{10} \gamma_i - \frac{10}{11} (\omega_1 + \omega_2) + \frac{1}{11} \omega_2 \right] + z \left(1,1 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{x_2 - x_1}{110} \right) - z(x_1 + 0,1x_2 + 0,01x_3 + 0,001x_4 + 0,0001x_5) \right\}. \quad (4)$$

Погрешность

$$\Delta e_x = e_{x_n} - e_{x_2} = I \left[\frac{10}{11} \sum_1^{x_1} \alpha_i - \frac{1}{11} \sum_{x_1+1}^{10} \alpha_i + 0,1 \sum_0^{x_2} \beta_i - 0,01 \sum_{x_3+1}^{10} \gamma_i + \right. \\ \left. + \frac{10}{11} (\omega_1 + \omega_2) - \frac{1}{11} \omega_2 \right] - I z \left(1,1 + \frac{x_2 - x_1}{110} \right) + z e_{x_n}. \quad (5)$$

Здесь первый член соответствует погрешности, появляющейся вследствие неточности сопротивлений, второй — неправильности отношения токов I_M и I_H и третий — ошибке в величине самого тока I , зависящей от неправильности дополнительного устройства.

Это сложное выражение может быть значительно упрощено, если освободить его от членов, входящих в так называемую „погрешность нулевого показания“, равную напряжению между точками $+X \dots -X$ при нулевых положениях всех рычагов.

+14 -14

Эта погрешность легко определяется простым опытом. Нужно замкнуть зажимы $+X$ и $-X$ накоротко, поставить переключатель $N-X$ на X и включить ток в рабочую цепь потенциометра по нормальной схеме. Гальванометр должен быть, как обычно, соединён с зажимами G .

Переключают направление тока в цепи потенциометра и замечают изменение отклонения гальванометра. Затем ставят рычаг пятой декады ($\times 0,0001$) на I и снова переключают ток в цепи потенциометра, замечая изменение отклонения гальванометра. Пусть в первом случае получено изменение отклонения в n делений шкалы, а во втором — n' делений (следует принять во внимание знак отклонений).

Подстановка в выражение (4)

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = 0$$

даёт значение напряжения между зажимами $+X \dots -X$:

$$e_{x_{30}} = kn = I \left[\frac{1}{11} \sum_1^{10} x_i - 0,1 \beta_0 + 0,01 \sum_1^{10} \gamma_i - \frac{10}{11} (\omega_1 + \omega_2) + \right. \\ \left. + \frac{1}{11} \omega_2 \right] + 1,1 z_0 I, \quad (6)$$

где k — цена деления гальванометра в вольтах.

Во втором случае, при

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0 \text{ и } x_5 = 1$$

$$e'_{x_{30}} = kn' = I \left[\frac{1}{11} \sum_1^{10} x_i - 0,1 \beta_0 + 0,01 \sum_1^{10} \gamma_i - \frac{10}{11} (\omega_1 + \omega_2) + \right. \\ \left. + \frac{1}{11} \omega_2 + 0,0001 \right] + 1,1 z_0 I. \quad (7)$$

Так как

$$e'_{x_{30}} - e_{x_{30}} = k(n' - n) = 0,0001 I,$$

погрешность нулевого показания

$$I = \frac{k(n' - n)}{0,0001} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{e_{x_{10}}}{I} = \frac{\epsilon n}{I} = 0,0001 \frac{n}{n-n} = -\frac{1}{11} \sum_1^{10} \alpha_i + 0,1 \beta_0 -$$

$$- 0,01 \sum_1^{10} \gamma_i + \frac{10}{11} (\omega_1 + \omega_2) - \frac{1}{11} \omega_2 - 1,1 \epsilon_0. \quad (9)$$

В выражениях (6), (7) и (9) через ϵ_0 обозначена погрешность отношения токов при нулевом положении рычагов. Как видно из выражения (9), погрешность ω не зависит от положения рычагов и постоянна при любом показании потенциометра. Её следует вычитать из отсчета при каждом измерении на потенциометре.

Остающаяся после этого погрешность потенциометра будет равна

$$e_{x_n} - I\omega - e_{x_n} = I \left[\sum_1^{x_1} \alpha_i + 0,1 \sum_1^{x_2} \beta_i + 0,01 \sum_1^{x_3} \gamma_i - (\epsilon - \epsilon_0) \left(1,1 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{x_2 - x_0}{110} \right) - \epsilon_0 \frac{x_2 - x_0}{110} \right] + \delta e_{x_n} = I\eta. \quad (10)$$

Действительное значение э.д.с. e_x

$$e_{x_1} = e_{x_n} - I\omega - I\eta = e_{x_n} (1 - \delta) + I \left[-\omega - \sum_1^{x_1} \alpha_i - 0,1 \sum_1^{x_2} \beta_i - \right.$$

$$\left. - 0,01 \sum_1^{x_3} \gamma_i + (\epsilon - \epsilon_0) \left(1,1 + \frac{x_2 - x_0}{110} \right) + \epsilon_0 \frac{x_2 - x_0}{110} \right]. \quad (11)$$

Диссельгорст в своей работе [1] дал следующее выражение для действительного значения измеряемой э. д. с.:

$$e_{x_d} = I \left(x_1 + 0,1 x_2 + 0,01 x_3 + 0,001 x_4 + 0,0001 x_5 + \sum_1^{x_1} \alpha_i + \right.$$

$$\left. + 0,1 \sum_1^{x_2} \beta_i + 0,01 \sum_1^{x_3} \gamma_i - \omega - \epsilon - \frac{x_2 - x_0}{110} \right) = e_{x_n} + I \left(\sum_1^{x_1} \alpha_i + \right.$$

$$\left. + 0,1 \sum_1^{x_2} \beta_i + 0,01 \sum_1^{x_3} \gamma_i - \omega - \epsilon - \frac{x_2 - x_0}{110} \right).$$

В этом выражении α , β , γ и ε имеют смысл поправок, а не погрешностей. Кроме того, Диссельгорстом не принята во внимание разница между ε_0 , т. е. погрешностью в отношении токов при нулевых положениях рычагов, и ε , т. е. той же погрешностью при каких-то иных положениях. В остальном выражения для e_{x_d} совпадают, однако это происходит потому, что Диссельгорстом приняты упрощенные выражения для e_{x_d} и ω , а именно:

$$e_{x_d} = I \left[x_1 + \Sigma x_2 + \frac{x_3 + \Sigma \beta}{10} + \frac{x_4 + \Sigma \gamma}{100} + \frac{x_5}{1000} + \right. \\ \left. + \frac{x_6}{10000} - \varepsilon \left(1,1 + \frac{x_2 - x_3}{110} \right) \right]$$

и

$$\omega = 1,1 \varepsilon,$$

что, как видно из формул (4) и (9), не соответствует действительности. Кроме того, в статье Диссельгорста ничего не говорится о погрешности δ дополнительного устройства.

Обратимся теперь к определению погрешностей отношения токов $\frac{I_{III}}{I_{II}}$, обозначенных через ε_0 и ε , из которых ε_0 — погрешность при нулевых положениях рычагов, а ε — при любых иных положениях.

Для определения ε_0 Диссельгорстом дан очень остроумный и простой способ. Гальванометр отключают от зажимов G и присоединяют к контактам $-I$ и 10 декады I . Рычаг этой декады ставят на 0 . На нули ставят и рычаги остальных декад, за исключением декады IV , рычаг которой ставят на -10 (см. схему рис. 1). В случае, если прибор не имеет контакта -1 на первой декаде, используют соответствующий ему вывод.

Включают рабочий ток, а затем, переключая его направление, замечают изменение отклонения гальванометра. Затем ставят рычаг декады IV в положение 9 и снова замечают изменение отклонения гальванометра при изменении полярности тока с первоначальной на последующую, учитывая его знак. Пусть в первом случае гальванометр даст изменение отклонения в m_0 , а во втором — в m'_0 делений.

Напряжение между контактами -1 и 10 первой декады при $x_1 = x_2 = x_3 = x_5 = 0$ и $x_4 = 10$, вызывающее отклонение в m_0 делений, будет иметь вид

$$cm_0 = \left(\frac{10}{11} I + \frac{10}{121} I \varepsilon_0 \right) (0,989 - \omega_1 + 0,0011 \cdot 10) - \left(\frac{1}{11} I - \right.$$

$$-\frac{10}{121} I \varepsilon_0 \left(10 - \sum_1^{10} \alpha_i \right) = \frac{10}{11} I \left(-\omega_1 + 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i + \varepsilon_0 \right) \quad (12)$$

При
напряжении

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_5 = 0 \text{ и } x_4 = 9$$

$$\begin{aligned} \sigma m'_0 &= \left(\frac{10}{11} I + \frac{10}{121} \varepsilon_0 I \right) (0,989 - \omega_1 + 0,0011 \cdot 9) - \left(\frac{1}{11} I - \frac{10}{121} I \varepsilon_0 \right) \times \\ &\times \left(10 - \sum_1^{10} \alpha_i \right) = \frac{10}{11} I \left(-\omega_1 + 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i + \varepsilon_0 - 0,0011 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Так как

$$-0,0011 \frac{m_0}{m'_0 - m_0} = \varepsilon_0 + 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i - \omega_1,$$

то

$$\varepsilon_0 = \omega_1 - 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i - 0,0011 \frac{m_0}{m'_0 - m_0}. \quad (14)$$

Разность $\varepsilon - \varepsilon_0$ может быть определена следующим образом.

Отношение токов $\frac{I_{III}}{I_{II}}$ равно отношению сопротивлений $\frac{R_{II}}{R_{III}}$.
Введя для погрешностей катушек замещающих декад I, II, III обозначения $\alpha'_i, \beta'_i, \gamma'_i$, можно написать для сопротивлений R_{II} и R_{III} развернутые выражения:

$$\begin{aligned} \frac{I_{III}}{I_{II}} = \frac{R_{II}}{R_{III}} &= \frac{1}{10} (1 - \varepsilon) = \\ &= \frac{99 - \sum_1^{x_1} \alpha_i - \sum_{x_1+1}^{10} \alpha'_i - \omega_1 - \omega_2 - \omega_3 - 0,11 \sum_0^{x_2} \beta'_i - 0,11 \sum_{x+1}^{10} \beta'_i}{990 - \sum_{x_1+1}^{10} \alpha_i - \sum_0^{x_2} \alpha'_i - \omega_2 - 0,11 \sum_{x_2+1}^{10} \gamma'_i - 0,11 \sum_0^{x_1} \gamma'_i - \omega'_2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь 98,9989 округлено до 99 и 989,9979 — до 990. Если написать упрощенно

$$\frac{I_{III}}{I_{II}} = \frac{1}{10} (1 - \varepsilon) = \frac{99(1 + \theta)}{990(1 + \psi)}$$

то

$$\varepsilon = \theta - \psi \quad \text{и} \quad \varepsilon_0 = \theta_0 - \psi_0$$

где θ_0 и ψ_0 — те же θ и ψ , только с подставленными в них вместо x_1 , x_2 и x_3 нулями.

Подстановка даёт

$$\begin{aligned} \varepsilon - \varepsilon_0 = & \frac{\sum_1^{x_1} \alpha_i + \sum_{x_1+1}^{10} \alpha'_i - \sum_1^{10} \alpha'_i + 0,11 \sum_0^{x_2} \beta_i - 0,11 \beta_0 - 0,11 \sum_1^{10} \beta'_i + 0,11 \sum_{x_2+1}^{10} \beta'_i}{99} + \\ & - \frac{\sum_{x_1+1}^{10} \alpha_i + \sum_1^{10} \alpha_i - \sum_0^{x_1} \alpha'_i + \alpha'_0 - 0,11 \sum_{x_2+1}^{10} \gamma_i + 0,11 \sum_1^{10} \gamma_i - 0,11 \sum_0^{x_3} \gamma'_i}{990} + \\ & + \frac{0,11 \gamma'_0 \sum_1^{x_1} \alpha_i - \sum_1^{x_1} \alpha'_i + 0,1 \left(\sum_1^{x_2} \beta_i - \sum_1^{x_2} \beta'_i \right) + 0,01 \left(\sum_1^{x_3} \gamma_i - \sum_1^{x_3} \gamma'_i \right)}{90} = \\ = & \frac{\sum_1^{x_1} (\alpha_i - \alpha'_i) + 0,1 \sum_1^{x_2} (\beta_i - \beta'_i) + 0,01 \sum_1^{x_3} (\gamma_i - \gamma'_i)}{90}, \quad (16) \end{aligned}$$

Так как погрешности ω_1 , ω'_1 , ω_2 , ω'_2 и ω_3 входят как в ε , так и в ε_0 и взаимно сокращаются.

Формула (15) позволяет выразить и погрешность отношения токов при нулевых положениях рычагов (т. е. ε_0) в функции от всех сопротивлений потенциометра:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 = \theta_0 - \psi_0 = & \left(\frac{\sum_1^{10} \alpha'_i - 0,1 \alpha'_0 - 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i + 0,11 \beta_0 + 0,11 \sum_1^{10} \beta'_i}{99} + \right. \\ & \left. - 0,011 \sum_1^{10} \gamma_i - 0,011 \gamma'_0 + \omega_1 + \omega'_1 + \omega_2 - 0,1 \omega_3 - 0,1 \omega'_3 \right) \quad (17) \end{aligned}$$

Сравнение формул (16) и (17) позволяет отдать отчёт в том, насколько существенно может измениться ε при перемещении рычагов. В самом неблагоприятном случае, когда все погрешности основных декад имеют противоположный знак по сравнению с погрешностями замещающих декад и равны 10^{-p} каждого сопротивления, погрешность ε_0 равна $-\frac{12}{99} 10^{-p}$, а изменение погрешности $\varepsilon - \varepsilon_0$ при $x_1 = x_2 = x_3 = 10$ может достигнуть значения $\frac{22}{90} 10^{-p}$. Такой случай, конечно, маловероятен, однако эти цифры показывают, что не следует пренебрегать проверкой равенства сопротивлений замещающих декад сопротивлениям основных декад.

3. ПОВЕРКА ПОТЕНЦИОМЕТРА

При пользовании потенциометром для получения точного результата измерения должны быть введены поправки, которые определяются формулой (11)

$$e_{x_1} = e_{xm}(1-\delta) + I \left[-\sum_1^{x_1} \alpha_i - 0,1 \sum_1^{x_2} \beta_i - 0,01 \sum_1^{x_3} \gamma_i - \omega + (\varepsilon - \varepsilon_0)(1,1 + \frac{x_2 - x_1}{110}) + \varepsilon_0 \frac{x_2 - x_1}{110} \right].$$

Проверка потенциометра преследует цель получить таблицы, позволяющие подсчитать значения входящих в это выражение поправочных членов для любых положений рычагов x_1, x_2, x_3 .

Таким образом, подлежат определению:

- а) погрешности $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{10}$ катушек первой декады
 " $\beta_{01}, \beta_{12}, \beta_2, \dots, \beta_{10}$ " второй "
 " $\gamma_{01}, \gamma_{12}, \gamma_2, \dots, \gamma_{10}$ " третьей "

- б) погрешность нулевого показания $\omega = -0,0001 \frac{n}{n-m}$

- в) погрешность отношения токов при нулевом положении рычагов

$$\varepsilon_0 = \omega_1 - 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i - 0,0011 \frac{m}{n-m},$$

что в свою очередь требует определения погрешности сопротивления четвертой декады при нулевом положении ее рычага;

- г) разность погрешностей отношения токов по формуле (16)

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{\sum_1^{x_1} (\alpha_i - \alpha'_i) + 0,1 \sum_1^{x_2} (\beta_i - \beta'_i) + 0,01 \sum_1^{x_3} (\gamma_i - \gamma'_i)}{10};$$

- д) погрешность δ дополнительного устройства ДП для различных значений рабочего тока I .

Для проверки требуется следующая аппаратура: поверенный потенциометр малого сопротивления, образцовые катушки I класса в 1, 10, 100, 1000 и 10 000 Ω , чувствительный гальванометр малого сопротивления (порядка 10 Ω) и несколько переносных аккумуляторов.

Определение погрешностей по пп. (а), (б) и (в) производят путём сравнения катушек декад I, II и III с одноомной образцовой катушкой. Подручно с проверкой декады I определяют погрешность ω , "нулевого сопротивления" декады IV.

А. Проверка декад I, II и III может быть выполнена со сличения катушек декады I с образцовой одноомной катушкой. Схема соединений изображена на рис. 4. Для устранения ответвления тока в верхнюю часть схемы рычаг декады III снимают. Попутно проверяют „нулевое сопротивление“ декады IV, которое имеет

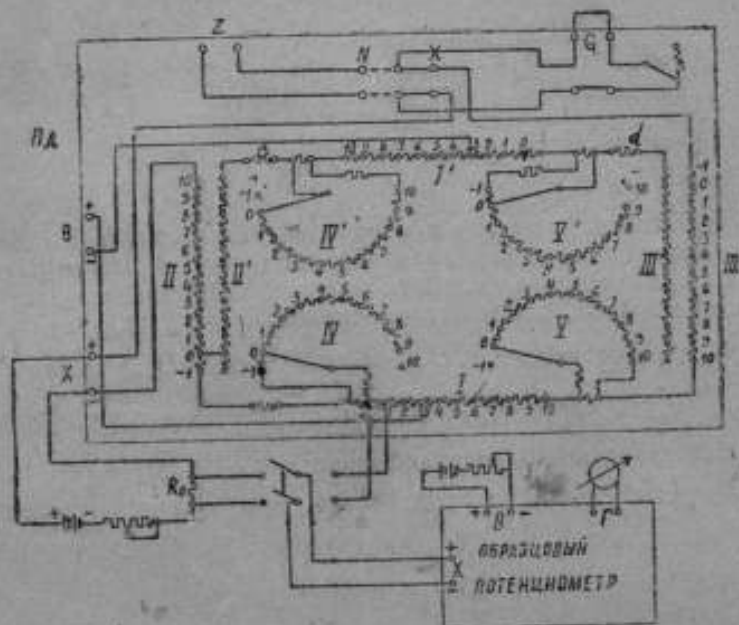


Рис. 4. Схема проверки сопротивления декад I, II и III путем сличения с образцовой катушкой. Рычаг декады III снят.

номинальное значение $0,989 \Omega$, и тем самым определяют погрешность σ_1 .

Результаты могут быть сведены в табл. 2.

Затем по той же схеме производят проверку декад II и III, которую можно выполнить, например, так. Сличают 9 катушек декады II (или III) с одноомной образцовой катушкой, а затем сличают все катушки декады с катушкой между контактами 0...1. Получают следующие результаты:

$$0,11 \left(9 - \sum_{i=1}^9 z_i \right) = R_2,$$

где R_2 — численное значение сопротивления девяти катушек между контактами 0...9.

Декада $\times 1^*$

Условные показания x_i	Катушки между контактами	Действитель- ные значения сопротивле- ния в омах $1 - \alpha_i$	Относитель- ные погреш- ности α_i	Суммы отно- сительных погрешностей $\sum_{i=1}^n \alpha_i$
0	—	0	0	0
1	0...1	$1 - \alpha_1$	α_1	α_1
2	1...2	$1 - \alpha_2$	α_2	$\sum_{i=1}^2 \alpha_i$
3	2...3	$1 - \alpha_3$	α_3	$\sum_{i=1}^3 \alpha_i$
...
9	8...9	$1 - \alpha_9$	α_9	$\sum_{i=1}^9 \alpha_i$
10	9...10	$1 - \alpha_{10}$	α_{10}	$\sum_{i=1}^{10} \alpha_i$
Декада $\times 0,001^*$				
0	—	$0,999 - \alpha_1$	α_1	—

Пусть при сличении катушек с первой будет получено:

$$0,11 (1 - \beta_0) = b_0 B$$

$$0,11 (1 - \beta_1) = b_1 B$$

$$0,11 (1 - \beta_2) = b_2 B$$

$$\dots$$

$$0,11 (1 - \beta_9) = b_9 B$$

$$0,11 (1 - \beta_{10}) = b_{10} B$$

где B — действительное значение сопротивления первой катушки в омах, а b_0, b_1, \dots, b_{10} — коэффициенты.

Сумма равенств от 2-го до 10-го дает

$$\sum_{i=1}^{10} R_i = (1 + b_1 + b_2 + \dots + b_{10}) B = B \sum_{i=1}^{10} b_i$$

откуда

$$B = \frac{R_2}{\sum_{i=1}^{10} b_i}$$

после чего уже легко вычислить относительные погрешности

$$\beta_0 = 1 - b_0 (1 - \beta_1) \cong 1 - b_0 + \beta_1; \beta_1 = 1 - \frac{B}{0,11}; \beta_2 = 1 - b_2 + \beta_1$$

и т. д.

Результаты сводят в табл. 3.

Декада $\cdot \times 0,1^*$

Таблица 3

Условные показания x_2	Кагушки между контактами	Действительные значения сопротивления в омах	Относительные погрешности β_i	Суммы относительных погрешностей $\sum_1^i \beta_i$
—	0 ... 9	$0,11 (9 - \sum_1^9 \beta_i) = R_2$	—	—
-1	—	0	0	$-\beta_0$
0	-1 ... 0	$0,11 (1 - \beta_0) = b_0 B$	$\beta_0 = 1 - b_0 + \beta_1$	0
1	0 ... 1	$0,11 (1 - \beta_1) = B$	$\beta_1 = 1 - \frac{B}{0,11}$	β_1
2	1 ... 2	$0,11 (1 - \beta_2) = b_2 B$	$\beta_2 = 1 - b_2 + \beta_1$	$\sum_1^2 \beta_i$
...
9	8 ... 9	$0,11 (1 - \beta_9) = b_9 B$	$\beta_9 = 1 - b_9 + \beta_1$	$\sum_1^9 \beta_i$
10	9 ... 10	$0,11 (1 - \beta_{10}) = b_{10} B$	$\beta_{10} = 1 - b_{10} + \beta_1$	$\sum_1^{10} \beta_i$

$$B = \frac{R_2}{1 + b_2 + b_3 + \dots + b_9}$$

Для декады III составляют аналогичную таблицу (табл. 4)

Б. Определение погрешности нулевого показания ω . Согласно формуле (9)

$$\omega = -0,0001 \frac{n}{n' - n}$$

Эта погрешность определяется способом, который уже описан выше. Перед определением ω следует изменить схему питания потенциометра на нормальную (т. е. через зажимы $\pm B$), присоединить гальванометр к зажимам G, поставить рычаг декады III на место и замкнуть накоротко зажимы $\pm X$.

В. Определение погрешности отношения токов ϵ_0 . Для определения погрешности ϵ_0 переносят провода от

Таблица 4

Декада $\times 0,01^*$

Условные показатели x_0	Катушки между кон- тактами	Действительные значения сопротивления в омах	Относительные погрешности γ_i	Суммы относи- тельных по- грешностей $\frac{\epsilon_x}{\sum_1^x \gamma_i}$
—	0...9	$0,11 (9 - \sum_1^9 \gamma_i) = R_9$	—	—
-1	—	0	0	$-\gamma_0$
0	-1...0	$0,11 (1 - \gamma_0) = c_0 C$	$\gamma_0 = 1 - c_0 + \gamma_1$	0
1	0...1	$0,11 (1 - \gamma_1) = C$	$\gamma_1 = 1 - \frac{C}{0,11}$	γ_1
2	1...2	$0,11 (1 - \gamma_2) = c_1 C$	$\gamma_2 = 1 - c_1 + \gamma_1$	$\sum_1^2 \gamma_i$
...
9	8...9	$0,11 (1 - \gamma_9) = c_9 C$	$\gamma_9 = 1 - c_9 + \gamma_1$	$\sum_1^9 \gamma_i$
10	9...10	$0,11 (1 - \gamma_{10}) = c_{10} C$	$\gamma_{10} = 1 - c_{10} + \gamma_1$	$\sum_1^{10} \gamma_i$

$$C = \frac{R_9}{1 + c_0 + c_1 + \dots + c_9}$$

гальванометра к контактам —1 и 10 декады I. Если декада I не имеет контакта —1, присоединяют гальванометр к заменяющему его выводу. Все рычаги ставят на нули, за исключением рычага декады IV, который ставят на 10. Далее определяют отклонения гальванометра m_0 и m'_0 , как было описано выше.

Нужные для определения ϵ_0 значения ω_j и $\sum_1^{10} \alpha_i$ могут быть взяты из полученных ранее таблиц.

Г. Определение разности погрешностей отношения токов $\epsilon_0 - \epsilon$. Для определения разности погрешностей

отношения токов при данных и нулевых положениях рычагов декад I, II и III нужно знать разности

$$\sum_1^{x_1} \alpha_i - \sum_1^{x_1'} \alpha_i' = \sum_1^{x_1} (\alpha_i - \alpha_i'), \quad \sum_1^{x_2} \beta_i - \sum_1^{x_2'} \beta_i' = \sum_1^{x_2} (\beta_i - \beta_i')$$

и

$$\sum_1^{x_3} \gamma_i - \sum_1^{x_3'} \gamma_i' = \sum_1^{x_3} (\gamma_i - \gamma_i')$$

Для вычисления первой разности необходима проверка первой замещающей декады I, которая производится аналогично декаде I сличением с одноомной образцовой катушкой. Так как катушки с и d потенциометра имеют относительно большое сопротивление, цепь тока целесообразно составить так, чтобы они в неё не входили. Цепь батареи может быть присоединена, например, к контактам — I декады IV' и 10 декады V', на которые следует поставить щётки. Результаты могут быть записаны в табл. 5.

Замещающая декада „X I“

Таблица 5

Условные показания x_1	Катушки между контактами	Действительные значения сопротивления в омах $1 - \alpha_i'$	Относительные погрешности α_i'	Суммы относительных погрешностей $\sum_1^{x_1} \alpha_i'$
0	—	0	0	0
1	0...1	$1 - \alpha_1'$	α_1'	$\sum_1^1 \alpha_i'$
2	1...2	$1 - \alpha_2'$	α_2'	$\sum_1^2 \alpha_i'$
...
9	8...9	$1 - \alpha_9'$	α_9'	$\sum_1^9 \alpha_i'$
10	9...10	$1 - \alpha_{10}'$	α_{10}'	$\sum_1^{10} \alpha_i'$

Разности $\sum_1^{x_2} (\beta_i - \beta_i')$ и $\sum_1^{x_3} (\gamma_i - \gamma_i')$ могут быть определены при

той же схеме включения, при которой производилось определение α_i путём прокручивания рычагов декад II и III. Коммутируя ток потенциометра и наблюдая изменения отклонения гальвано-

83

$$h = +0,1 - (-3) = +3,1 \quad h' = +1,5 - (-4) = +5,5$$

$$h'' = +5 - (+2) = +3 \quad h'' = +5,5 - (-2) = +7,5$$

метра при положениях рычага декады IV на 10 и 9, можно определить значения m и m' , по которым могут быть вычислены значения ε_{x_1} и ε_{x_2} для всех положений рычагов декад II и III.

Это видно из следующего. Если в формулы (12) и (13) вместо m_0 , m'_0 и ε_0 подставить соответственно m_{x_2} , m'_{x_2} и ε_{x_2} или m_{x_1} , m'_{x_1} и ε_{x_1} , то можно получить выражения для погрешностей ε при различных положениях рычагов декад II и III, аналогичные формуле (14), а именно:

$$\varepsilon_{x_1} = \omega_1 - 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i - 0,0011 \frac{m_{x_1}}{m'_{x_1} - m_{x_1}} \quad (18)$$

и

$$\varepsilon_{x_2} = \omega_2 - 0,1 \sum_1^{10} \alpha_i - 0,0011 \frac{m_{x_2}}{m'_{x_2} - m_{x_2}} \quad (19)$$

Тогда

$$\varepsilon_{x_1} - \varepsilon_{x_2} = 0,0011 \left(\frac{m_0}{m'_0 - m_0} - \frac{m_{x_2}}{m'_{x_2} - m_{x_2}} \right) = \frac{0,1 \sum_1^{x_1} (\beta_i - \beta'_i)}{90} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_{x_1} = 0,0011 \left(\frac{m_0}{m'_0 - m_0} - \frac{m_{x_1}}{m'_{x_1} - m_{x_1}} \right) = \frac{0,1 \sum_1^{x_2} (\gamma_i - \gamma'_i)}{90} \quad (21)$$

Определив по полученным ранее таблицам значение $\frac{\sum_1^{x_1} (\beta_i - \beta'_i)}{90}$ можно подсчитать разность $\varepsilon - \varepsilon_0$:

$$\begin{aligned} -\varepsilon_0 &= \frac{\sum_1^{x_1} (\alpha_i - \alpha'_i) + 0,1 \sum_1^{x_2} (\beta_i - \beta'_i) + 0,01 \sum_1^{x_2} (\gamma_i - \gamma'_i)}{90} = \\ &= \frac{\sum_1^{x_1} (\alpha_i - \alpha'_i)}{90} + (\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_0) + (\varepsilon_{x_1} - \varepsilon_0). \end{aligned} \quad (22)$$

Результаты определения разностей $\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_0$ и $\varepsilon_{x_1} - \varepsilon_0$, если при

0,5 / +3
0,5 / -2

прокручивании рычагов установлено, что ими нельзя пренебречь, могут быть записаны в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Разности погрешностей $\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_0$ для декады $\cdot \times 0,1^*$

Условные показания x_2	Значения m_{x_2}	Значения m'_{x_2}	$\frac{m_{x_2}}{m'_{x_2} - m_{x_2}}$	$\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_0$
-1	$m_{x_2} = -1$	$m'_{x_2} = -1$	...	...
0	$m_{x_2} = 0 = m_0$	$m'_{x_2} = 0 = m_0$	$\frac{m_0}{m'_0 - m_0}$	0
1	$m_{x_2} = 1$	$m'_{x_2} = 1$	...	...
2	$m_{x_2} = 2$	$m'_{x_2} = 2$	...	...
...
9	$m_{x_2} = 9$	$m'_{x_2} = 9$	...	...
10	$m_{x_2} = 10$	$m'_{x_2} = 10$	...	...

Таблица 7

Разности погрешностей $\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_0$ для декады $\cdot \times 0,01^*$

Условные показания x_2	Значения m_{x_2}	Значения m'_{x_2}	$\frac{m_{x_2}}{m'_{x_2} - m_{x_2}}$	$\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_0$
-1	$m_{x_2} = -1$	$m'_{x_2} = -1$	...	...
0	$m_{x_2} = 0 = m_0$	$m'_{x_2} = 0 = m_0$	$\frac{m_0}{m'_0 - m_0}$	0
1	$m_{x_2} = 1$	$m'_{x_2} = 1$	...	...
...
9	$m_{x_2} = 9$	$m'_{x_2} = 9$	...	...
10	$m_{x_2} = 10$	$m'_{x_2} = 10$	...	...

На этом определение погрешностей основной части потенциометра может считаться законченным. При выводе выражения для в.д.с. e_{x_2} , как уже указывалось выше, влияние погрешностей декад IV и V считалось пренебрежимо малым. При подгонке всех сопротивлений потенциометра с одинаковой тщательностью это, конечно, справедливо. Однако могут быть случаи, когда вследствие повреждений или неисправностей эти погрешности стали ненормально большими. Поэтому для полной уверенности в потенциометре следует произвести контроль декад IV и V.

Способ проверки, предложенный Диссельгорстом, нельзя признать вполне удовлетворительным. Он предложил контролиро-

вать декады *IV* и *V* по отклонениям гальванометра при нормальной схеме его включения и замкнутых накоротко зажимах $\pm X$. Отклонение при показании

$$x_1 = x_2 = x_4 = x_5 = 0 \text{ и } x_3 = 1$$

должно равняться отклонению при показании

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_5 = 0 \text{ и } x_4 = 10.$$

Убедившись в этом, наблюдают пропорциональность отклонения гальванометра показаниям декады *IV*. Аналогично поступают и с декадой *V*: контролируют равенство единицы декады *IV* десяти единицам декады *V*, а затем все положения её рычага контролируют по пропорциональности отклонений гальванометра. Этот способ требует, во-первых, градуировки шкалы гальванометра (например, по уже поверенной декаде *III*), а, во-вторых, получаемая при этом точность отсчёта для контроля декады *IV* является недостаточной. Действительно, при желании быть уверенным в показаниях потенциометра с точностью до 10% от единицы последней декады, пришлось бы отсчитывать отклонение гальванометра, соответствующее 10 единицам декады *IV*, с точностью до 0,1%, что при обычном объективном методе отсчёта показаний гальванометра едва ли возможно.

Поэтому лучше поверку декад *IV* и *V* производить методом сличения с поверенным потенциометром Диссельгорста, рабочий ток которого устанавливают в 10 раз меньше рабочего тока поверяемого потенциометра, вследствие чего отсчёт по нему будет содержать на одну значащую цифру больше, чем по поверяемому. Согласование рабочих токов может производиться при наибольшем показании первой декады образцового потенциометра ($x_1 = 10$), чему будет соответствовать показание $x_1 = 1$ поверяемого потенциометра. Во все показания образцового потенциометра войдет „погрешность нулевого показания“ поверяемого потенциометра, которую следует из них исключить.

Следует также проконтролировать неизменность отношения токов ϵ при всех положениях рычагов декад *IV* и *V*, которое может производиться для декады *V* аналогично декадам *II* и *III*, а для декады *IV* — при соединении гальванометра с контактами *-I* и *10* замещающей декады *I'* и положении шетки декады *I'* на контакте *9*. Здесь достаточно убедиться, что при прокручивании рычагов отклонение гальванометра не изменяется.

Д. Поверка дополнительного устройства. Эдс нормального элемента ϵ_N компенсируется падением напряжения на сопротивлении катушки 10180 Ω и части катушек декад $\times 1$ и $\times 0,1$, на которых выставляются последние значащие цифры значения ϵ_N . Схему рис. 3 можно представить в виде изо-

браженном на рис. 5, на котором зажимы Z предполагаются замкнутыми накоротко. Здесь k — сопротивление катушки 10180 Ω и части декад, g и l — оставшиеся части декад вместе с катушкой 7 Ω , f — сопротивление шунта, зависящее от положения переключателя „Strom-tärke in Amp.“

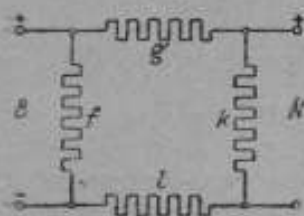


Рис. 5. Принципиальная схема дополнительного устройства ДУ с замкнутыми зажимами Z .

Эквивалентное сопротивление дополнительного устройства

$$R_s = \frac{f(g+k+l)}{f+g+k+l} \quad (23)$$

Эквивалентное сопротивление, на котором при прохождении рабочего тока I создаётся падение напряжения e_N (это сопротивление может быть измерено по падению напряжения между зажимами $+N$ и $-N$), с одной стороны равно

$$R_N = R_s \frac{k}{g+k+l} \quad (24)$$

с другой же стороны

$$R_N = \frac{e_N}{I} \quad (25)$$

причём I может принимать значения 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} и 10^{-1} А.

Пределы значений R_N для различных I даны в табл. 8.

Таблица 8

Пределы значений R_N для различных I

I в амперах	e_N в вольтах		R_N в омах	
	минимальное	максимальное	минимальное	максимальное
10^{-4}	1,0180	1,0193	10180	10193
10^{-3}			1018,0	1019,3
10^{-2}			101,80	101,93
10^{-1}			10,180	10,193

Пусть погрешность сопротивления R_s равна μ , сопротивления k — равна κ , а сопротивления $g+k+l$ — равна λ .

Действительное значение сопротивления R_N

$$R_{N_2} = R_N (1 - \mu) \frac{k(1-x)}{(x+k+\delta(1-x))} = R_N \frac{1-x}{1-x} (1 - \mu). \quad (26)$$

Если катушку 10180 Ω поверяют с точностью до 0,1 Ω , а погрешности сопротивлений декад не превосходят в сумме 0,05 Ω , то можно считать, что $x = k$, и

$$R_{N_2} = R_N (1 - \mu). \quad (27)$$

С другой стороны,

$$R_{N_2} = \frac{e_N}{I_2} = \frac{e_N}{I(1-\delta)} = \frac{R_N}{1-\delta}. \quad (28)$$

Из равенств (27) и (28) следует, что

$$1 - \mu = \frac{1}{1-\delta} = 1 + \delta \quad (29)$$

и

$$\delta = -\mu.$$

Эти рассуждения позволяют сделать вывод, что для определения погрешности δ необходимо, во-первых, измерить сопротивление R_{N_2} и, во-вторых, убедиться, что погрешности декад малы. Измерение R_{N_2} должно быть произведено при различных положениях переключателя „Stromstärke in Amp.“ путём сравнения напряжения между зажимами $\pm N$ с образцовыми катушками в 10¹, 10², 10³ и 10⁴ Ω . Рычаги декад могут при этом стоять на нуле.

Пусть отношение напряжения между зажимами $\pm N$ к напряжению на образцовой катушке равно q , т. е.

$$\frac{I_2 R_{N_2}}{I_1 R_{O_2}} = \frac{R_{N_2}}{R_{O_2}} = \frac{R_N (1-\mu)}{R_{O_2}} = \frac{e_N (1-\mu)}{I R_{O_2}} = q. \quad (30)$$

откуда

$$\delta = -\mu = q \frac{R_{O_2}}{e_N} - 1. \quad (31)$$

Одно из четырёх полученных таким образом значений δ может быть использовано при подсчёте по формуле (11) действительных значений измеренной на потенциометре электродвижущей силы e_x .

На этом заканчивается проверка потенциометра. Полученные результаты позволяют определить все поправки к показаниям потенциометра. Точность, с которой должны определяться погрешности, вообще говоря, зависит от желаемой точности результата, а также от самого показания потенциометра. При участии всех декад ($x_i \geq 1$) можно измерять электродвижущие силы от 10^{-4} до 1 V. Если желательно получать верные показания с точностью до 0,1 единицы последней декады, то α_i ; α'_i ; β_i ; ω ; ϵ_0 в $\pm \tau_0$ должны определяться с точностью до 0,00001, γ_i — до 0,0001. Для проверки желательно применять, как уже было указано, поверенный низкоомный потенциометр (лучше всего потенциометр Диссельгорста) с низкоомным же гальванометром, имеющим чувствительность к напряжению порядка $30 \dots 50 \frac{mV}{\mu V}$.

Правильность приведённых выше теоретических заключений была проверена экспериментально в Лаборатории электрических измерений ВНИИМ. Кроме того, был поставлен ряд опытов для сравнительной оценки различных методов проверки, а также произведена полная проверка нескольких потенциометров фирмы O. Wolff. Во всех этих работах деятельное участие принимал сотрудник Лаборатории В. А. Борисов, и автор пользуется случаем выразить ему свою признательность.

Опыты показали, что погрешности этих потенциометров не являются пренебрежимо малыми. В некоторых случаях суммарная погрешность измеренного значения электродвижущей силы, вызванная погрешностями как потенциометра, так и дополнительного устройства, достигала 0,05%. Поэтому для точных измерений следует пользоваться поверенными потенциометрами и вводить поправки в их показания.

Следует иметь в виду, что полученные описанными выше способами результаты проверки могут обеспечить действительное повышение точности измерений лишь в том случае, если измерительная установка будет применяться в надлежащих условиях. Должны быть приняты все меры к устранению нестабильности режима, к устойчивости электродвижущей силы нормального элемента и показаний гальванометра. Возможные причины возникновения погрешностей при потенциометрических измерениях подробно освещены в работе W. Krukowski [4].

Опытами, произведенными в Лаборатории электрических измерений ВНИИМ при участии Е. К. Михайловой, установлено, что ток обычных кислотных аккумуляторов принимает постоянное значение (с точностью до 0,01%) лишь спустя долгое время после включения или резкого изменения нагрузки. Рассчитывать на более или менее длительное постоянство тока можно лишь в том случае, если он не превосходит 1% от значения десятичасового разрядного тока аккумулятора. Кроме того, аккумулятор должен

находиться при постоянной температуре, так как изменение последней на 1°C вызывает изменение тока $1...2 \cdot 10^{-2}\%$.

Если при измерениях не отнестись с должным вниманием к стабильности режима установки и каждого её элемента, то могут появиться случайные погрешности, значительно превосходящие по величине те погрешности, о которых идёт речь в настоящей работе. Очевидно, что тогда введение поправок едва ли будет иметь смысл.

ВЫВОДЫ

Опубликованные до настоящего времени описания свободного от термоэлектродвижущих сил потенциометра по Диссельгорсту содержат неполное рассмотрение погрешностей, зависящих от неправильной подгонки сопротивлений. В них не рассматриваются погрешности, вносимые дополнительным устройством для проверки рабочего тока по нормальному элементу.

Настоящая работа восполняет этот пробел, давая оценку влияя неточности всех элементов потенциометра и дополнительного устройства на верность результатов измерения. В ней изложена также, по возможности в систематическом виде, методика проверки, обеспечивающая высокую точность определения поправок.

Работа может быть использована не только лицами, имеющими дело с проверкой потенциометров, но и лицами, непосредственно применяющими их для практических измерений. По результатам проверки, полученным изложенными в работе методами, могут быть вычислены все поправочные члены выражения для действительного значения измеряемой электродвижущей силы.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Diesselhorst. Zeitschr. für Instrumentenkunde, т. 28, 1908.
2. М. М. Попова. Термометрия и калориметрия, 1934, ОНТИ.
3. В. И. Кротова. Потенциометры, 1940, ВНИИМ.
4. W. Krukowski. Annales de l'Académie des Sciences Technique à Warsowie, т. 1, 1935, стр. 123.

ОСТЫВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Влияние наложения магнитного поля при остывании материала на его магнитные свойства изучалось уже в 1913 г. Пендером и Джонсом (H. Pender, K. L. Jones) [1]. Авторы наблюдали увеличение максимальной проницаемости (на 60%) кремнистой стали при наложении переменного магнитного поля во время остывания. Аналогичный эффект был получен также для динамной стали.

В 1914 г. Вильсон (E. Wilson) получил увеличение максимальной проницаемости кремнистой стали до 11 000 CGS μ_0 после остывания ее в постоянном магнитном поле [2].

В 1934 г. Келсол (G. A. Kelsall) получил очень высокое значение максимальной проницаемости некоторых ферромагнитных сплавов при медленном их остывании в постоянном магнитном поле [3]. У пермаллоя (78,5% Ni) μ_{max} была больше 140 000 CGS μ_0 . Такой же эффект наблюдался для перминвара (45% Ni; 30% Fe; 25% Co). Келсол показал, что самое высокое значение μ_{max} получается тогда, когда намагничивающее поле совпадает по направлению с полем, действовавшим во время остывания материала; в направлениях, перпендикулярных к этому полю, значения μ_{max} понижаются. Отношение этих значений μ_{max} для пермаллоя составляет около 14, а для перминвара — 70.

Дальнейшими опытами Бозорта, Диллинджера и Келсола (R. M. Bozorth, T. F. Dillinger, G. A. Kelsall) в 1934 г. было установлено, что μ_{max} у пермаллоя с 65% Ni увеличилась от 10 000 до 250 000 CGS μ_0 при нагревании до 700°С и медленном охлаждении в поле напряженностью 15 Oe [4]. У образцов, ранее подвергавшихся нагреванию в водороде при 1400°С, μ_{max} возросла до 600 000 CGS μ_0 .

Изменение магнитных свойств материалов при остывании в постоянном магнитном поле Бозорт объясняет тем, что все элементарные области намагничиваются до насыщения в определенном кристаллографическом направлении (ближайшем к направлению поля) и удерживаются в этих положениях благодаря возникновению магнитострикции [5]. По теории Бозорта этот эффект

не наблюдается, если точка Кюри лежит в интервале между комнатной температурой и температурой, при которой кристаллы освобождаются от напряжений (400—500° С). Действительно, для никеля (низкая точка Кюри) и для железа (малая магнитоstriction) этот эффект ничтожен.

В 1935 г. Диллинджер и Бозорт произвели детальное исследование сплавов железа с кобальтом и никелем, а также двух сплавов: пермаллоя (65% Ni; 35% Fe) и перминвара (20% Fe; 60% Co; 20% Ni) и установили повышение проницаемости сплавов после охлаждения в магнитном поле.

Даль и Паулек (O. Dahl u. Fr. Pawlek) повторили опыты Бозорта на образцах с различной текстурой для сплавов Ni—Fe и Ni—Fe—Co [7], подтвердив полученные Бозортом результаты.

В 1938 г. Оливер и Шедден (Oliver u. Shedden) исследовали эффект остывания в постоянном магнитном поле сплава Alnico (18% Ni; 10% Al; 54% Fe; 12% Co; 6% Cu) [8]. Образец имел форму кубика со стороной 4,0 см. После остывания в магнитном поле образец размагничивался, после чего снимался гистерезисный цикл. При этом обнаружилось, что в направлении поля, приложенного во время остывания, значение $(BH)_{\max}$ увеличилось на 20%, а по направлению, перпендикулярным к полю $(BH)_{\max}$ уменьшилось на 10%. Напряжённость поля, приложенного при остывании, составляла 4400 Oe. Отношение остаточной намагниченности J_r к намагниченности при насыщении J_s также получилось разным. При намагничивании полем, направление которого совпадало с полем, приложенным во время остывания, отношение $\frac{J_r}{J_s} = 0,72$; когда же намагничивающее поле было перпендикулярно направлению поля при остывании образца, $\frac{J_r}{J_s} = 0,61$, а для материала, остывавшего без поля, $\frac{J_r}{J_s} = 0,67$.

Ни в одной из упомянутых выше работ не исследовалась остаточная намагниченность, возникающая при остывании ферромагнитных материалов в постоянном магнитном поле. В дальнейшем, для краткости, будем называть эту величину термоостаточной намагниченностью.

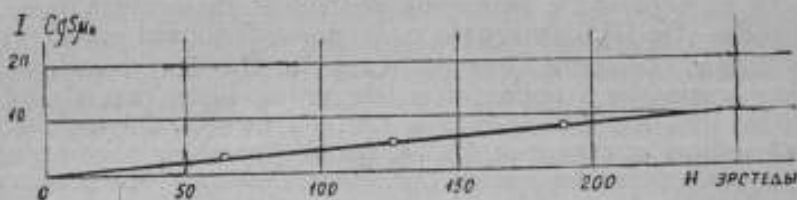
При изучении вопроса о происхождении естественной остаточной намагниченности горных пород мы выяснили, что естественная остаточная намагниченность пород является термоостаточной намагниченностью. Высокое значение естественной остаточной намагниченности пород можно объяснить остыванием их в слабом магнитном поле земли [9].

Наложение постоянного магнитного поля на образцы различных горных пород во время их остывания от точки Кюри до комнатной температуры действует так же, как наложение

переменного поля с убывающей до нуля амплитудой на постоянное поле, т. е. повышает намагниченность образцов.

Если сопоставить значения остаточной намагниченности J_r , получаемой после намагничивания в некотором постоянном поле и термоостаточной намагниченности J_{rt} для той же напряжённости намагничивающего поля, то оказывается, что J_{rt} значительно превосходит J_r . Отношение $\frac{J_{rt}}{J_r}$ особенно велико в слабых магнитных полях (от нескольких эрстед до нескольких десятков эрстед для различных горных пород), и стремится к единице

1. Рис. с



с возрастанием напряжённости намагничивающего поля. Чем больше коэрцитивная сила породы, тем выше отношение J_{rt} к J_r .

Эффект термоостаточного намагничивания характерен только для пород, содержащих включения тех или иных ферромагнитных минералов; у парамагнитных пород он отсутствует.

С физической точки зрения, интересно было изучить явление термоостаточного намагничивания также и для различных сталей. Для опытов были взяты образцы никель-алюминиевой, вольфрамовой и кобальтовой сталей. Намагниченность образца определялась на аstaticком магнитометре путём сравнения магнитного момента образца с магнитным моментом катушки известных параметров. Образцы имели форму прямоугольных стержней длиной 23 см и площадью поперечного сечения около 1 см². Нагревание происходило в электрической печи, помещенной внутри намагничивающей катушки. Температура измерялась с помощью термопары Pt—PtRh.

Все приводимые ниже данные измерений относятся к разомкнутой магнитной цепи.

НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЕВАЯ СТАЛЬ

(состав: Fe—58%; Ni—22%; Al—14%)

Начальный участок основной кривой намагничивания приведен на рис. 1; остаточная намагниченность не показана вследствие её малого значения ($< 1 \text{ CGS}$).

Изменение намагниченности при остывании от точки Кюри (около 800°С) до комнатной температуры в магнитных полях раз-

ной напряжённости показано на рис. 2. Быстрый рост намагниченности наблюдается в области понижения температуры образца от 700 до 500° С. При сравнении рис. 1 и 2 мы видим, что намагниченность, соответствующая напряжённости поля в 250 Ое при комнатной температуре на рис. 2 примерно в 7 раз больше

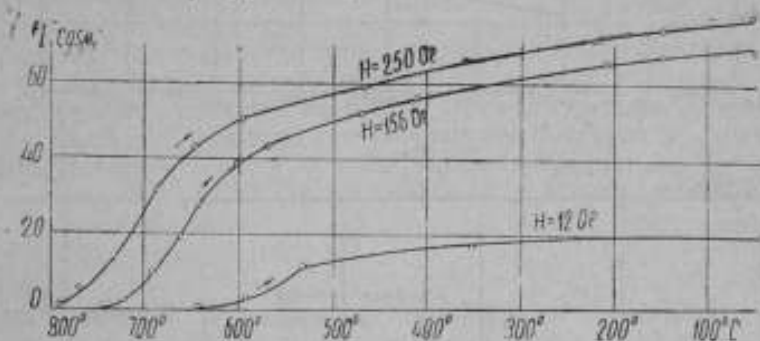


Рис. 2.

намагниченности для той же напряжённости поля на рис. 1. Для поля 12 Ое это повышение намагниченности выражено еще резче. Это объясняется сильным ростом остаточной намагниченности образца при остывании его в постоянном магнитном поле.

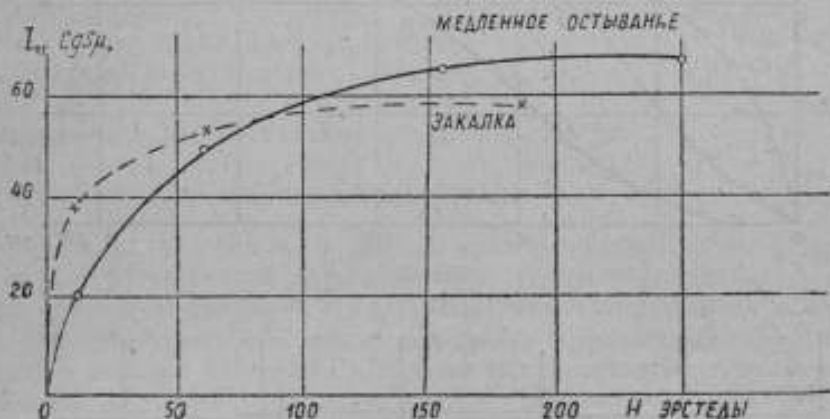


Рис. 3.

После нагревания до точки Кюри и остывания в магнитном поле образец был размагничен и снова была определена основная кривая намагничения. Оказалось, что эта кривая осталась без изменения, т. е. образец после нагревания сохранил свою магнитную восприимчивость.

Термоостаточная намагниченность образца определялась сле-

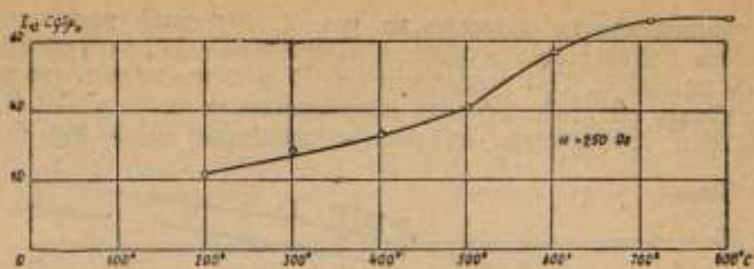


Рис. 4.

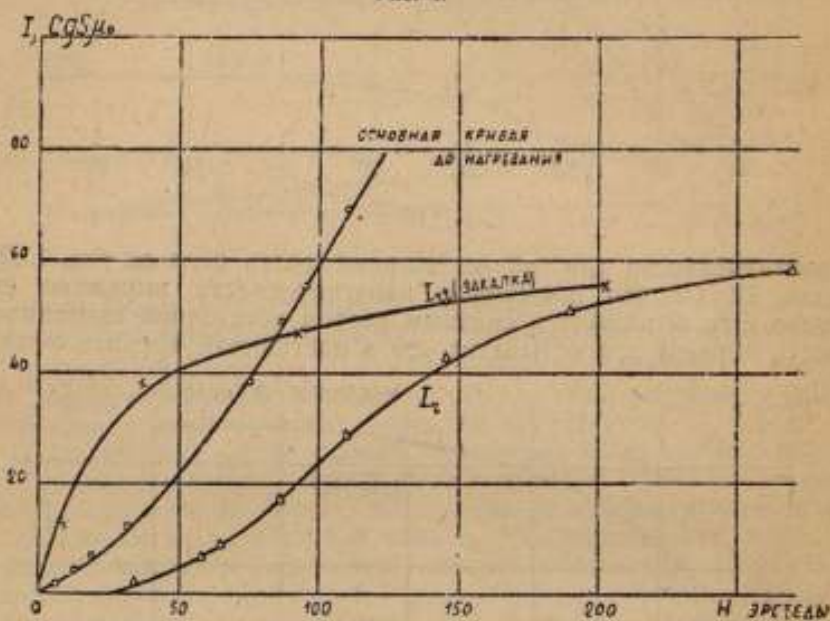


Рис. 5.

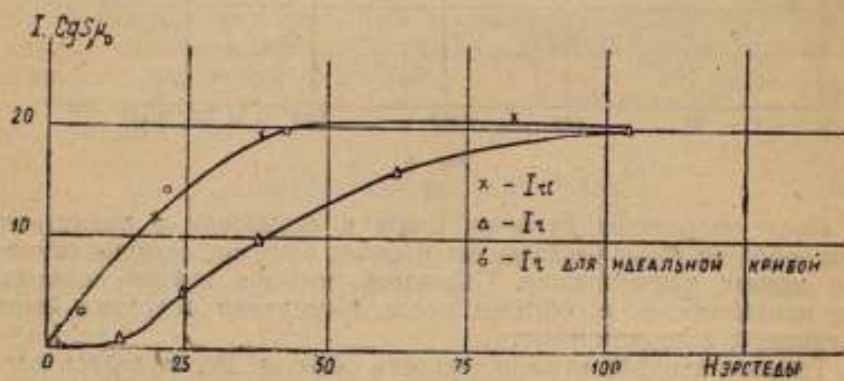


Рис. 6.

дующим образом. Исследуемый образец нагревался до точки Кюри, затем накладывалось постоянное магнитное поле известной напряженности, и образец остывал в этом поле. После достижения образцом комнатной температуры магнитное поле выключалось и измерялась термоостаточная намагниченность образца.

Зависимость термоостаточной намагниченности от напряженности намагничивающего поля, при котором происходило остывание образца, показана на рис. 3. Время остывания образца от точки Кюри до комнатной температуры составляло примерно 4 часа. После остывания в поле напряженностью 200 *Oe* значение J_{re} достигает 66 $CGS\mu_0$. В обычных условиях эта величина намагниченности может быть получена только после действия поля напряженностью 1880 *Oe*.

На рис. 3 приведены также значения J_{re} , полученные при закалке образца в воде и действии намагничивающего поля различной напряженности. Мы видим, что быстрое охлаждение образца даёт результаты примерно того же порядка, что и медленное охлаждение.

На рис. 4 приведена зависимость J_{re} от температуры, при которой включалось магнитное поле напряженностью 250 *Oe*. Образец нагревался до 800—820°С, затем при его остывании накладывалось постоянное поле 250 *Oe*, каждый раз начиная с определенной температуры. При достижении образцом комнатной температуры постоянное поле выключалось и измерялся магнитный момент образца. Из рис. 4 видно, что наибольший рост J_{re} наблюдается в том случае, когда постоянное поле накладывается в области температур 500—700°С.

ВОЛЬФРАМОВАЯ СТАЛЬ (6% W)

Начальный участок основной кривой намагничения и кривая $J_c = f(H)$, снятые до нагревания, показаны на рис. 5. Там же приведена кривая $J_{re} = f(H)$, полученная при закалке в воде и действии магнитных полей различной напряженности (температура закалки 800—820°С). При напряженностях поля примерно до 100 *Oe* величина J_{re} значительно больше J_c , с ростом же напряженности поля эта разница уменьшается.

Остаточная намагниченность в разомкнутой магнитной цепи после намагничения полем напряженностью 1880 *Oe* составляет 66 $CGS\mu_0$. Термоостаточная же намагниченность J_{re} , полученная при 200 *Oe*, составляет 55 $CGS\mu_0$.

Влияние остывания в магнитном поле на повышение остаточной намагниченности значительно меньше у вольфрамовой стали, чем у никель-алюминиевой, вследствие того что коэрцитивная сила вольфрамовой стали меньше, чем никель-алюминиевой.

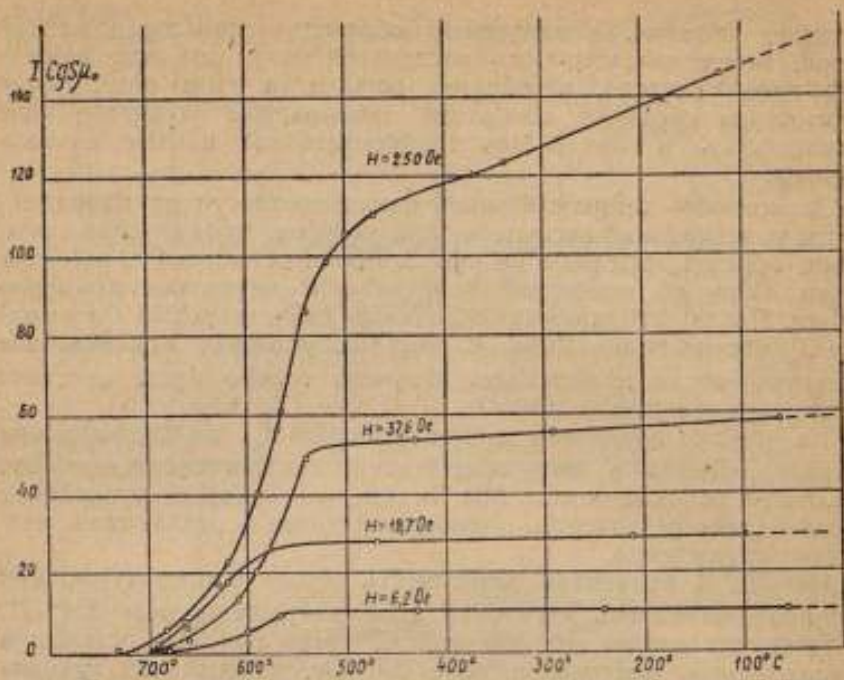


FIG. 7.

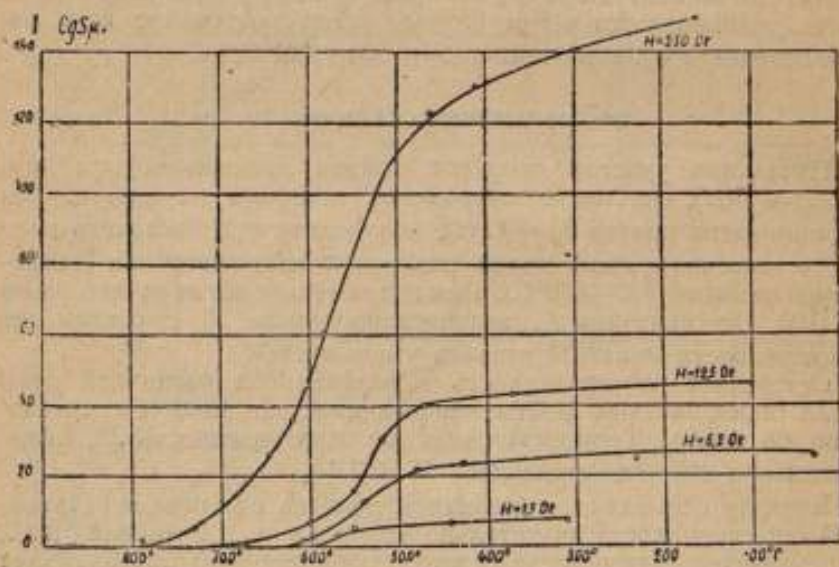


FIG. 8.

Кроме закалённых образцов, исследовалась также отожжённая вольфрамовая сталь с коэрцитивной силой 15 *Oe*. Расхождение между J_r и J_c для отожжённого образца ещё меньше, чем для закалённого образца, но всё же ясно выражено в полях до 50 *Oe*

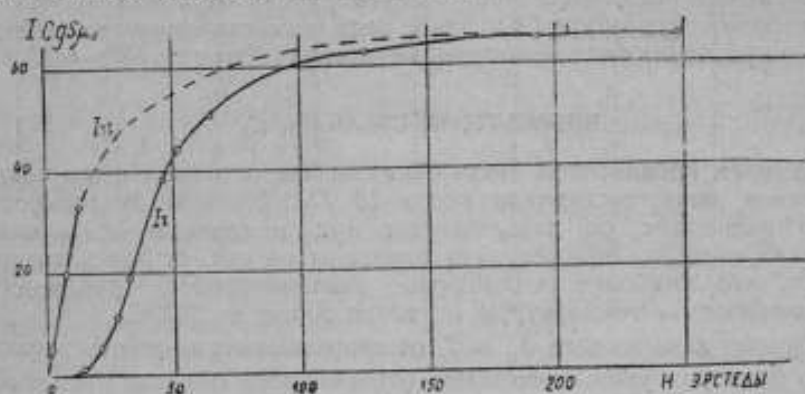


Рис. 9.

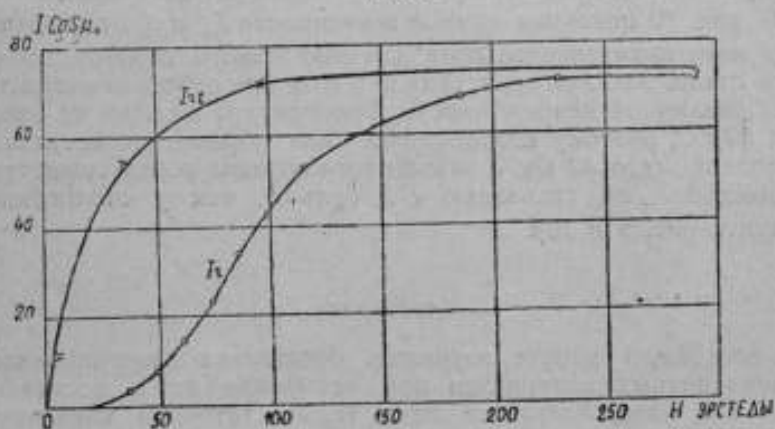


Рис. 10.

(рис. 6). Термоостаточная намагниченность измерялась после медленного остывания образца от точки Кюри до комнатной температуры в магнитном поле.

На том же рисунке показаны значения остаточной намагниченности J_r , полученные после наложения переменного магнитного поля с амплитудой, убывающей от 240 *Oe* до нуля, на постоянное поле различной напряжённости (аналогично намагничению при определении идеальной кривой намагничения.)

Кривая остаточной намагниченности, полученная таким образом, совпадает с кривой $J_r = f(H)$.

На рис. 7 показаны кривые возрастания намагниченности образца отожжённой вольфрамовой стали при остывании его в магнитных полях различной напряжённости от точки Кюри до комнатной температуры. Быстрый рост намагниченности наблюдается при понижении температуры от точки Кюри до 550—500° С.

КОБАЛЬТОВАЯ СТАЛЬ (5% С)

Образец кобальтовой стали был сначала отожжён и его коэрцитивная сила составляла всего 19 *Oe*. Кривые зависимости намагниченности от температуры при медленном остывании в полях разной напряжённости показаны на рис. 8. Здесь также видно, что наиболее резкий рост намагниченности происходит при понижении температуры от точки Кюри до 500° С.

Кривые зависимости J_r и J_c от напряжённости намагничивающего поля для указанного выше отожжённого образца представлены на рис. 9. Расхождение между обеими кривыми имеет тот же характер, что и для отожжённой вольфрамовой стали.

На рис. 10 показаны кривые зависимости J_r и J_c от напряжённости намагничивающего поля для закалённого образца кобальтовой стали. Закалка происходила в воде при действии магнитных полей различной напряжённости. Температура закалки не превышала 800° С, поэтому коэрцитивная сила образца после закалки составляла всего 42 *Oe*. У закалённого образца кобальтовой стали повышение J_r по сравнению с J_c больше, чем у отожжённого (сравнить рис. 9 и 10).

Выводы

В настоящей работе изучалась остаточная намагниченность ферромагнитных материалов при остывании их в постоянном магнитном поле, названная нами термоостаточной намагниченностью. Исследовались кобальтовая, вольфрамовая и никель-алюминиевая стали. Термоостаточная намагниченность измерялась после медленного остывания в магнитном поле и после закалки в воде в присутствии магнитного поля.

Нагревая образец до точки Кюри и давая ему охладиться в постоянном магнитном поле, можно намагнитить его до насыщения полем значительно меньшей напряжённости, чем при обычных условиях.

Наиболее резкий эффект наблюдается у материала с большой коэрцитивной силой; для намагничивания никель-алюминиевой стали практически до насыщения требуется напряжённость магнитного поля 200 *Oe* вместо 2000—2500 *Oe*.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Pender and R. L. Jones. The annealing of steel in an alternating magnetic field, *Physical Review*, 1913, v. 1, p. 259.
2. E. Wilson. On the properties of magnetically Schielded iron as affected by temperature, *Proc. Royal Society, A*, 1914, v. 90, p. 343.
3. E. Wilson. An additional note on the production of high permeability in iron., *Proc. Royal Soc.*, 1914, v. 91, p. 104.
4. G. A. Kelsall. Permeability changes in ferromagnetic materials heat treated in magnetic fields, *Physics*, 1934, v. 5, N 7, p. 169.
5. R. M. Bozorth, J. F. Dillinger and G. A. Kelsall. Magnetic material of high permeability attained by heat treatment in a magnetic field. *Phys. Review*, 1934, v. 45, N 10, p. 742.
6. R. M. Bozorth. Theory of the heat treatment of magnetic materials, *Phys. Review*, 1934, v. 46, p. 232.
7. J. F. Dillinger and R. M. Bozorth. Heat treatment of magnetic materials in a magnetic field, I, II; *Physics*, 1935, v. 6, N 9, p. 279; p. 285.
8. O. Dahl und Fr. Pawlex. Einfluss von Faserstruktur und Magnetfeldabkühlung auf den Magnetisierungsverlauf, *Zeitschrift für Physik*, 1935, S. 504.
9. O. Hiver and S. Hedden. Cooling of permanent magnet alloys in a Constant magnetic field, *Nature*, July, 1933.
10. Т. Н. Розе. Магнитные свойства некоторых горных пород при высоких температурах, 1939. Диссертация (Лен. Гос. Университет).

РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПОДКОВООБРАЗНЫХ МАГНИТОВ

При расчёте постоянных магнитов одним из основных вопросов является правильная оценка магнитной проводимости путей утечки потока по длине магнита. Применяемые в настоящее время формулы для вычисления проводимости являются или слишком громоздкими, или недостаточно обоснованными с точки зрения применения их для расчёта подковообразных магнитов и не во всех случаях дают удовлетворительные результаты. Это побудило автора настоящей статьи провести сравнение различных методов расчёта проводимостей, базируясь на определении проводимости экспериментальным путём.

1. ПРОВОДИМОСТЬ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ НОЖКАМИ ПОДКОВООБРАЗНОГО МАГНИТА

При расчёте проводимости между параллельными ножками магнита Эвершед (S. Evershed) [1] пользовался формулой для проводимости на 1 см длины двух равных параллельных цилиндров

$$g = \frac{\pi}{\ln(n + \sqrt{n^2 - 1})}, \quad (1)$$

где $n = \frac{l}{d}$;

l — расстояние между центрами параллельных цилиндров;
 d — диаметр цилиндров.

В случае, когда ножки магнита имеют прямоугольное сечение, он заменяет их эквивалентными параллельными цилиндрами, диаметр которых

$$d = \frac{\text{периметр сечения}}{\pi}.$$

Видоизменением формулы (1) является применявшаяся уже ранее Томпсоном [2] формула

$$R = \frac{1}{\pi} \ln \frac{2a}{b + 2a - \sqrt{b^2 + 4ab}}, \quad (2)$$

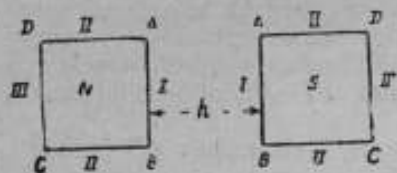


Рис. 1.

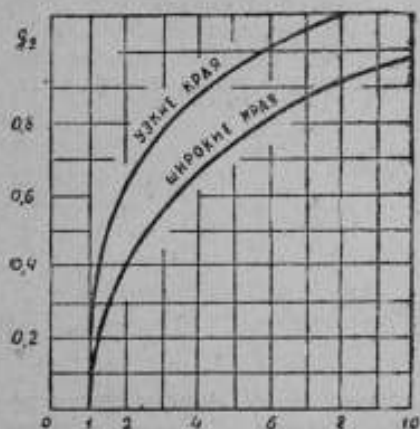


Рис. 2.

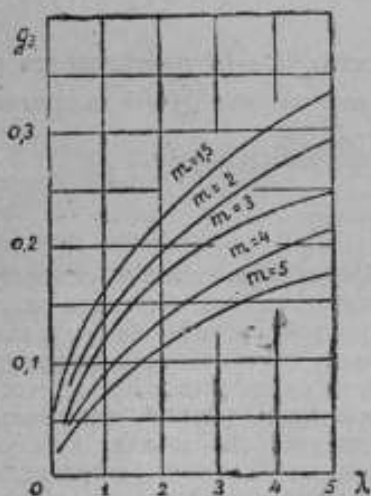


Рис. 3.

где R — магнитное сопротивление на единицу длины;

a — радиус цилиндров;

b — кратчайшее расстояние между цилиндрами.

Эта формула (в нескольких видах) применялась Драйсделем (C. Drysdale) и Джолей (A. Jolley) [3]

$$g = \frac{\pi}{\ln \left[\frac{1 + \sqrt{1 - d^2}}{d} \right]} \quad (3)$$

Уравнения (1), (2) и (3) имеют одно и то же значение, только выраженное в различных формах, и представляют собой формулы, применяемые при расчётах плоскопараллельного электростатического поля.

Кремп (W. Cramp) и Кальдервуд (N. Calderwood) [4] дают методику расчёта проводимости между параллельными прямоугольными ножками магнита, расчлняя общую проводимость на частичные проводимости между отдельными параллельными плоскостями. При этом пользуются формулами и кривыми, полученными путём сложных математических вычислений из уравнений Максвелла.

Здесь мы приведём применявшийся ими метод расчёта с той лишь разницей, что, для согласования с дальнейшим изложением, расчёт проводимости будет везде отнесён к единице длины ножек. Поле между рассматриваемыми элементами поверхностей будем принимать плоскопараллельным.

Метод расчёта Кремп и Кольдервуд сводится к определению проводимостей между параллельными плоскостями I—I, между параллельными плоскостями II—II, лежащими в одной плоскости и между параллельными плоскостями III—III, обращёнными в противоположные стороны (рис. 1).

Проводимость между плоскостями I—I, если края AD „узкие“, вычисляется по формуле

$$g_1 = \frac{AB + \frac{h}{\pi}}{h} \quad (4)$$

Если края AD „широкие“ и расстояние h мало, то проводимость вычисляется по формуле

$$g_1 = \frac{AB + \frac{h}{\pi}(1 - \ln 2)}{h}, \quad (5)$$

или

$$g_1 = \frac{AB + 0,307 \frac{h}{\pi}}{h}. \quad (6)$$

Проводимость g_2 между плоскостями II—II определяется по кривым, установленным Кремп и Кольдервуд. Кривые, изображённые на рис. 2, дают зависимость g_2 от m , где

$$m = \frac{h + 2 AD}{h}.$$

Проводимость g_3 между плоскостями III—III определяется по указанной выше величине m и по отношению $\frac{DC}{h} = \lambda$ из кривых, установленных теми же авторами (рис. 3).

Общая проводимость на 1 см длины ножек будет равна

$$g = g_1 + 2g_2 + 2g_3. \quad (7)$$

Формулы и кривые Кремп и Кольдервуд, хотя и основаны на кропотливом математическом анализе, всё же обладают рядом недостатков. Подразделение поверхностей магнита на отдельно рассматриваемые плоскости не может отразить того характера распределения поля, который реально существует. Кроме того, конечные результаты получены рядом приближений, вызванных сложностью решения общей математической задачи. Следует также отметить, что пределы применения понятий „широкие“ и „узкие“ края ещё и до настоящего времени остаются невыясненными.

Мы предлагаем при расчёте проводимостей заменять поверхности ножек магнита параллельными плоскостями. В этом случае возможно применение простой формулы, аналогичной формуле (4), а именно:

$$g = \frac{P + \frac{h}{\pi}}{h} \quad (8)$$

Опыт показывает, что ширину $P = QQ$ эквивалентных плоскостей можно взять равной периметру сечения ножек магнита, приняв расстояние между ними h равным кратчайшему расстоянию между ножками (рис. 4).

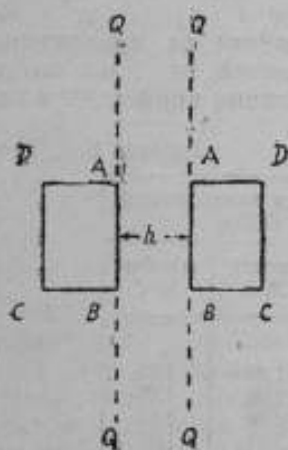


Рис. 4.

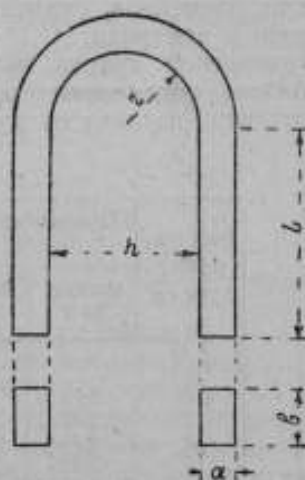


Рис. 5.

С целью сравнения методов вычисления проводимостей с экспериментальными данными и изучения распределения проводимостей по длине магнитов были исследованы четыре подковообразных магнита из закалённой вольфрамовой стали. Размеры магнитов указаны в сантиметрах табл. 1 и соответствуют рис. 5.

Таблица 1

№ магнита	L	h	a	b	r
1	9	4,10	1,27	3,50	2,05
2	9	4,16	1,26	3,07	2,08
3	7	3,16	0,59	1,81	1,58
4	9	5,02	0,90	2,50	2,51

Для исследования проводимостей по длине ножек магнита необходимо было изучить на протяжении той же длины распределение магнитного потока и магнитодвижущей силы. Поток измерялся баллистическим методом при сбрасывании измерительной катушки, охватывающей магнит, с различных размеченных позиций, а магнитодвижущая сила измерялась прямолинейным потенциалометром путем удаления его от тех же самых точек магнита за пределы действия поля [5].

Проводимости на 1 см длины ножек магнита вычислялись по формуле

$$g = \frac{1}{F} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta x},$$

где F — магнитодвижущая сила между средними точками отдельных элементов, симметрично расположенных по отношению к нейтрали;

$\Delta\Phi$ — изменение потока внутри магнита на протяжении Δx .

Результаты определения проводимостей на 1 см по длине ножек магнита, начиная от дуги до концов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расстояние от дуги см	Проводимость на 1 см длины ножек в единицах CGS ₃₀			
	магнит № 1	магнит № 2	магнит № 3	магнит № 4
0				
1	2,13	2,01	1,90	1,73
2	2,31	2,05	2,08	1,80
3	2,34	2,17	2,05	1,82
4	2,42	2,25	2,01	1,85
5	2,44	2,35	2,22	1,87
6	2,51	2,35	2,35	1,93
7	2,58	2,42	2,75	2,00
8	2,75	2,65		2,12
9	3,20	3,11		2,23

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что величина проводимости не является постоянной, а постепенно возрастает по длине ножек, начиная от дуги до концов. Это обстоятельство обусловлено, очевидно, тем, что силовые линии в окружающем магнит пространстве претерпевают большее сжатие соседними областями поля у дуги, чем у концов магнита.

Для сравнения приведенных выше результатов со значениями проводимостей, вычисленными по существующим методам, целесообразно с точки зрения оценки применимости этих методов к изучаемым формам магнитов, брать среднюю по длине величину g . Кроме того, среднее значение g , как показывает

магнитный спектр, соответствует проводимости в тех участках магнита, где поле между ножками приближается к плоскопараллельному. Последнее же является основой всех методов вычисления проводимостей.

В соответствии с этим в табл. 3 даны для каждого магнита экспериментальные значения g , как средние арифметические из всех значений по длине ножек, а также вычисленные по методу параллельных цилиндров, по методу Кремпа и Кольдервуда и по формуле (8). По методу Кремпа и Кольдервуда производился расчёт для „узких“ и „широких“ краев с целью выяснения применимости этих понятий для исследованных форм магнитов.

Таблица 3

№ магнита	Проводимость на 1 см в единицах CGS ₂₀				
	экспериментально определённая	вычисленная по методу параллельных цилиндров	вычисленная по методу Кремпа и Кольдервуда		вычисленная по формуле (8)
			„узкие“ края	„широкие“ края	
1	2,52	2,69	2,46	2,03	2,65
2	2,38	2,42	2,36	1,64	2,40
3	2,18	2,11	2,13	1,35	2,09
4	1,83	1,89	1,92	1,22	1,68

Приведённые в табл. 3 результаты показывают, что понятие „широкие“ края при вычислении по методу Кремпа и Кольдервуда для исследованных магнитов неприменимо, так как при этом получаются значительные расхождения (порядка 25%) с экспериментальными данными. Вычисленные же значения проводимостей по Кремпа и Кольдервуда при условии, что края считаются „узкими“, дают расхождения в пределах допустимых погрешностей. Значения проводимостей, вычисленных по методу параллельных цилиндров, также показывают достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными для всех четырёх магнитов.

Сравнение данных, приведённых в последней графе табл. 3, с экспериментальными показывает, что предположение о возможной замене поверхностей ножек параллельными плоскостями подтверждается для магнитов №№ 1, 2 и 3; для магнита же № 4 такая замена даёт расхождение расчётных и экспериментальных данных в 13%. Следует отметить, что магнит № 4 (см. табл. 1) в практике встречается довольно редко.

2. ПРОВОДИМОСТЬ В ДУГЕ ПОДКОВООБРАЗНОГО МАГНИТА

Для вычисления проводимости в дуге магнита Эвершед приравнял весь подковообразный магнит к эллипсоиду, большая

ось которого равен длине магнита, а малая — эквивалентному диаметру, определяемому по периметру сечения магнита.

Применяя для подсчёта формулу проводимости 1 см длины эллипсоида, он получил

$$g = \frac{\pi a^2}{l^2} \left(\frac{4\pi}{N} - 1 \right), \quad (9)$$

где g — проводимость 1 см длины дуги;

a — эквивалентный диаметр сечения;

l — длина магнита;

N — коэффициент размагничивания эллипсоида.

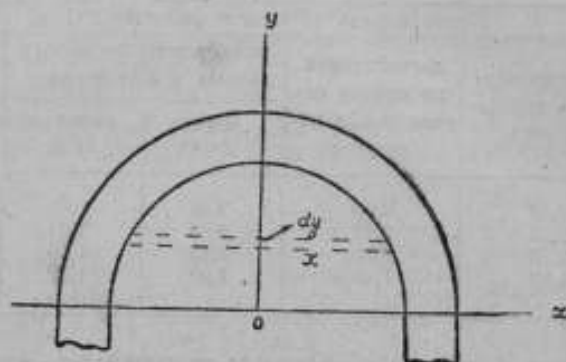


Рис. 6.

Полная проводимость в дуге определялась путем умножения g на половину длины дуги.

Другой путь для определения проводимости в дуге был дан Пику (R. Pico) [6], который заменял дугу двумя параллельными стержнями и рассчитывал проводимость обычным методом, как проводимость между параллельными ножками магнита. Длину таких стержней он брал равной $2,4 \rho$ (ρ — средний радиус дуги). Расстояние между стержнями принималось равным расстоянию между концами дуги.

Метод Эвершеда, так же как и метод Пику, не имеют строго теоретического обоснования, что затрудняет суждение о правильности того или другого метода без экспериментальной их проверки.

То обстоятельство, что дуга магнита представляет обычно полуокружность, даёт возможность создать более обоснованный расчёт проводимости.

Магнитный спектр поля подковообразных магнитов показывает небольшую вогнутость силовых линий в сторону ножек. Без большой погрешности можно считать, что силовые линии представляют собой прямые, соединяющие симметричные точки

внутренней полуокружности дуги. На рис. 6 изображена дуга магнита, причём оси координат выбраны так, что ось OY проходит через нейтральное сечение, а ось OX — через концы дуги.

Если радиус внутренней дуги равен r , то уравнение внутренней полуокружности будет

$$x^2 + y^2 = r^2.$$

Для нахождения всей проводимости дуги положим в основу наших рассуждений применённую ранее замену периметра, взяв поверхность, площадь которой равна площади поверхности дуги по всему периметру (рис. 7).

Ширина такой поверхности будет равна периметру сечения дуги, а длину, очевидно, необходимо взять равной средней длине дуги магнита. В соответствии с этим радиус поверхности будет равен среднему радиусу дуги. Применяя формулу (8), найдём элементарную проводимость между симметричными участками длины поверхности

$$dG = \frac{P + \frac{2x}{\pi}}{2x} dy.$$

Вся проводимость эквивалентной поверхности

$$G = \int_0^r \frac{P dy}{2\sqrt{r^2 - y^2}} + \int_0^r \frac{dy}{\pi} = \frac{\pi}{4} P + \frac{r}{\pi}$$

или

$$G = 0,785 P + 0,318 r, \quad (10)$$

где P — периметр сечения дуги;

r — средний радиус дуги.

Уравнение (10) представляет собой формулу для расчёта проводимости всей дуги подковообразного магнита.

Для экспериментальной проверки предлагаемой формулы и других методов расчёта были исследованы дуги четырех-

ранее изучавшихся подковообразных магнитов. Геометрические данные исследованных дуг магнитов приведены в табл. 4, где размеры даны в сантиметрах.

Таблица 4

№ магнита	Внутренний радиус r	Внешний радиус R	Средний радиус ρ	Периметр сечения P
1	2,05	3,32	2,68	9,54
2	2,98	3,34	2,71	8,65
3	1,58	2,57	2,08	5,60
4	2,51	3,41	2,96	6,80

Для экспериментального определения проводимости дуги измерялись значения потока в нейтральном сечении и на концах дуги баллистическим методом путём сбрасывания измерительной катушки. Магнитодвижущая сила измерялась прямолинейным потенциалометром.

Вычисление проводимости производилось по формуле

$$G = \frac{\Phi_0 - \Phi_k}{\frac{1}{2} F_k}, \quad (11)$$

где Φ_0 — поток в нейтральном сечении;

Φ_k — поток в концах дуги;

F_k — магнитодвижущая сила между концами дуги.

Полученные экспериментальным путём значения проводимостей служили критерием для сравнения расчётных методов вычисления проводимостей дуги.

В табл. 5 приведены значения проводимостей, определённых экспериментальным путем, посредством предлагаемой нами формулы (10), по методу Эвершеда и по методу Пику. По методу Пику проводимость между эквивалентными ножками вычислялась способом Кремп и Кольдервуд, считая края „узкими“.

Таблица 5

№ магнита	Проводимость дуги в единицах CGS ρ_0			
	экспериментально определенная	вычисленная по формуле (10)	вычисленная по методу Эвершеда	вычисленная по методу Пику
1	8,33	8,34	6,73	15,82
2	7,72	7,66	6,51	15,34
3	5,49	5,08	4,64	10,62
4	6,51	6,28	6,28	13,63

¹ Номера соответствуют номерам табл. 4.

Анализируя данные табл. 5, можно сделать следующее заключение об исследованных магнитах. По сравнению с экспериментальными данными метод Пикю дает погрешность порядка 100%. Вычисленные по методу Эвершеда значения проводимости для всех дуг оказываются меньшими экспериментально определенными, при этом погрешность равна 4—20%. Самые близкие к экспериментальным значениям проводимости получены при вычислении по предлагаемой формуле (10).

ВЫВОДЫ

1. Сравнение результатов вычисления с экспериментально полученными значениями проводимостей нескольких форм подковообразных магнитов показало достаточную точность вычисления по методу параллельных цилиндров, а также по методу Кремп и Кольдервуд, если считать края „узкими“. При широких „краях“ метод Кремп и Кольдервуд даёт большое расхождение с экспериментальными данными. Для магнитов исследованных форм применение понятия „широкие“ края ведёт к значительным погрешностям и поэтому должно быть отброшено при расчёте таких магнитов. Для вычисления проводимостей ножек магнитов, подобных исследованным магнитам №№ 1, 2 и 3, автор предлагает более простую формулу, позволяющую легко определять проводимость по периметру сечения ножек и наименьшему расстоянию между ними.

2. Сравнение результатов вычисления проводимости в дуге подковообразных магнитов с экспериментальными данными показывает большую неточность вычисления по методу Пикю.

Метод Эвершеда даёт преуменьшенные значения по сравнению с экспериментальными данными. Наиболее точные результаты получаются при вычислении проводимости по предлагаемой автором формуле.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Evershed, J. I. E. E., 1920, т. 58, стр. 780.
2. С. Томпсон. Электромагнит и электромагнитные механизмы, 1892.
3. C. Drysdale and A. Jolley. Electrical Measuring Instruments, 1924.
4. W. Cramp and N. Calderwood. J. I. E. E., 1923, т. 61, стр. 1061.
5. Г. К. Ягола. Измерение магнитодвижущей силы в постоянном магнитном поле при помощи магнитных потенциалометров, Сборник трудов ВНИИМ, 1940, вып. I /43/.
6. Р. Пикю. Постоянные магниты (перевод с французского), 1931.

А. А. ЮРГЕНС

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ВЫСОКООМНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Согласно предыдущим работам автора [1], наиболее подходящим типом высокоомных непроволочных сопротивлений являются углеродистые сопротивления. В настоящей статье изложены проведённые в Электроизмерительной лаборатории ВНИИМ опыты по изготовлению таких сопротивлений.

1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ФАРФОРОВЫХ ЗАГОТОВОК

В качестве основы сопротивлений были главным образом использованы одноканальные неглазурованные фарфоровые трубки, изготовленные на заводе им. Ломоносова.

Диаметр трубок выбирался из числа имеющегося на заводе стандартного ассортимента, в соответствии с желаемой нагрузочной способностью сопротивления и вопросами удобства их науглероживания.

Трубки, полученные с завода, разрезались на куски нужной длины с помощью тонкого шлифовального круга, и после резки торцы трубок заравнивались на большом горизонтально расположенном шлифовальном диске. Часть трубок, обладающая неровной поверхностью, подвергалась еще шлифованию по наружной цилиндрической поверхности (металлическими обжимками с наждаком).

Следует отметить, что не замечалось разницы между качеством сопротивлений, изготавливаемых из трубок с шлифованной и нешлифованной наружной поверхностью. Поэтому шлифование наружной поверхности производилось только в тех случаях, когда неровности, имеющиеся на поверхности трубок, могли служить помехой при нарезке резьбы.

II. ПОКРЫТИЕ ОСНОВЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ БЛЕСТЯЩИМ УГЛЕРОДОМ

При первых опытах была применена установка, изображённая схематически на рис. 1. Первоначально отсутствовал только измеритель скорости ИС.

Работа протекала следующим образом. Трубки, подлежащие

науглероживанию, помещались в пространство *B* вакуумной печи. При закрытии крана *I* воздух откачивался из печи до получения вакуума в 1 мм рт. ст. После этого медленно открывался кран *I* при работающем насосе и откачивался воздух, находившийся в колбе *A* над поверхностью налитого в неё бензина (был применён авиационный бензин).

Через несколько секунд после открывания крана *I* показания манометра *M* принимали стабильное значение, равное упругости паров бензина (порядка 100 мм рт. ст.). Тогда кран *I* закрывался,

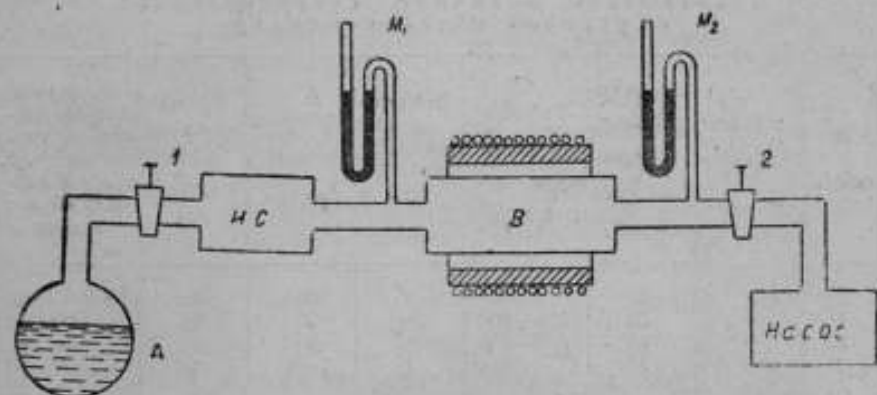


Рис. 1.

пространство *B* снова эвакуировалось до достижения давления в 1 мм рт. ст. и включался ток в печь. Печь нагревалась до температуры 900—1000°С и выдерживалась при этой температуре около 1 часа.

В это время насос запускался периодически для откачивания адсорбированных газов, выделяющихся из стенок вакуумной печи при её прогревании. Перед началом нагревания печи обычно проверялась герметичность установки. Она считалась удовлетворительной в том случае, если за полчаса из-за натекания газа давление в газопроводе и печи увеличивалось на величину, не большую 2—3 мм рт. ст.

После прогревания печи, при рабочей температуре в течение указанного выше времени, открывался кран *I* и пары бензина, вследствие собственной упругости, поступали в эвакуированное пространство *B* печи, где происходила реакция термического разложения углеводородов (входящих в бензин) на простейшие, которая частично шла до конца, т. е. до выделения углерода в чистом виде [2]. В результате фарфоровые трубки, заложенные в пространство *B*, покрывались тонким слоем химически чистого углерода — „блестящим углеродом“.

Толщина образовавшегося слоя зависела от температуры печи,

времени пропускания паров бензина, упругости и скорости их. Остатки прореагировавших паров бензина и образовавшийся водород выбрасывались из печи насосом. Скорость течения паров бензина и их давление регулировались кранами 1 и 2. Пока не было измерителя скорости ИС, приближённое представление о скорости течения паров можно было составить по сличению показаний манометров M_1 и M_2 .

Результаты первых четырёх опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Зависимость величины сопротивления от условий науглероживания

№ опыта	Длина печи в мм	Диаметр рабочего пространства печи в мм	Рабочая температура печи в $^{\circ}\text{C}$	Выдержка при рабочей температуре в часах	Давление в мм рт. ст.	Время пропускания газа в секундах	Величина сопротивления на трубках диаметром 8 мм и длиной 40 мм в омах
1	600	30	980	1	100	62	1500—3000
2	600	30	750—800	$\frac{1}{2}$	50	60	50000
3	600	30	830—850	$\frac{1}{2}$	20	10	∞
4	600	30	770	1	1—4	60	∞

Аппаратура, входящая в установку, имела следующие технические характеристики:

1. Насос—масляный, могущий создать вакуум в 0,01 мм рт. ст. при оптимальных условиях.

2. Печь—вакуумная, кустарного типа, собранная из обычной платиновой трубчатой горизонтальной печи завода „Платиноприбор“ (длина 600 мм, диаметр рабочего пространства 60 мм) и стальной трубы с фланцами.

3. M_1 и M_2 —стеклянные ртутные манометры.

4. Вся остальная аппаратура была сделана из стекла, а соединение между отдельными частями установки было осуществлено с помощью вакуумной резины (внутренний диаметр 6 мм, наружный диаметр—18 мм). Все части перед надеванием резины смазывались вакуумной смазкой.

Измеритель скорости, изготовленный позднее, представлял собой анемометр с диафрагмой (с малым отверстием), снабжённый микроманометром для измерения разности давлений, создающихся при течении газа перед диафрагмой и за ней. Фотография измерителя скорости изображена на рис. 2. Микроманометр был снабжён шкалой 0,5 м с 500 делениями; чувствительность его была порядка 0,006—0,007 мм рт. ст. на каждое деление шкалы. Скорость течения газа измерялась в условных единицах—деле-

ниях шкалы микроманометра. Градуировки измерителя скорости произвести не удалось, так как Аэрогидрометрическая лаборатория ВНИИМ не обладает аппаратурой для измерения скоростей газового потока при давлениях порядка 10—100 мм рт. ст.

Описанный выше метод науглероживания очень хорош при наличии разъемной электropечи типа, изображенного на рис. 3. К сожалению, в ВНИИМ нет печей этого типа, вследствие этого работа по схеме, изображенной на рис. 1, была неудобной, так как по окончании процесса науглероживания приходилось выжидать несколько часов, пока печь остынет до температуры

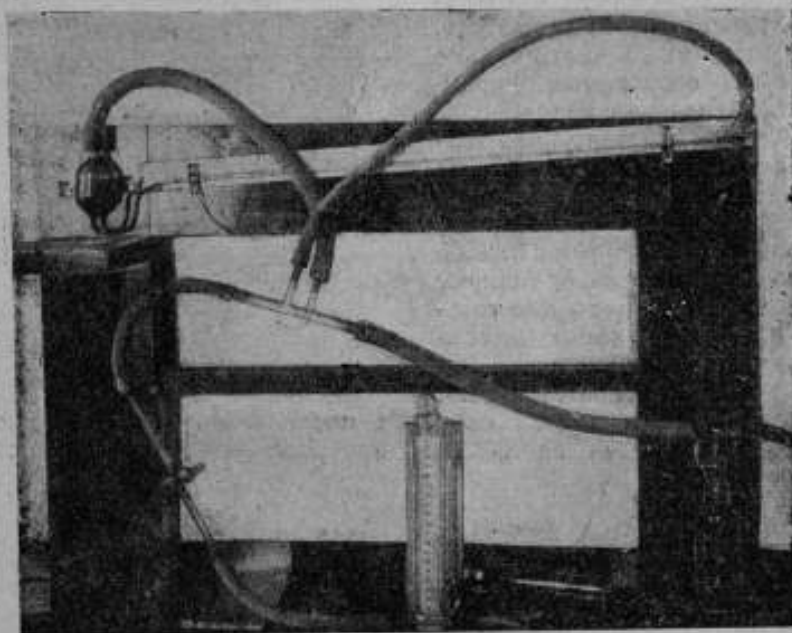


Рис. 2.

порядка 300°, при которой можно было пускать воздух в трубы с сопротивлениями без риска сжечь проводящий слой.

Повтому из соображений экономии времени схема установки была изменена (см. рис. 4). Взамен проточного течения паров бензина, они только впускались в рабочее пространство *B* вакуумной печи и через несколько минут откачивались из неё насосом. В остальном работа протекала так же, как и в первом случае. Преимущество этого способа заключалось в том, что по окончании процесса науглероживания стальная труба *B* могла быть вынута из печи без нарушения в ней вакуума.

Через 12 минут после удаления стальной трубы-вкладыша из печи её температура равнялась 200°С; таким образом удалось

довести продолжительность рабочего цикла до 25 минут, при условии, что диаметр фарфоровой заготовки был меньше 8 мм.

При сборке установки по схеме рис. 4 предполагалось, что при открытии крана 1 бензин будет вследствие диффузии поступать в пространство В печи, где он будет полностью разлагаться на углерод и водород. Такое явление, повидимому, наблюдалось, так как при отсутствии натекания воздуха, давление, отмечаемое манометром M_1 , непрерывно возрастало, что могло иметь место только за счёт возрастания парциального давления водорода.

Однако оказалось, что толщина наращенного слоя не зависит от времени, в течение которого пространство В остаётся соединённым с колбой А и, следовательно, процесс наращивания происходит только в самый момент впуска бензиновых паров в печь. Вероятно, это объясняется тем, что из-за весьма малой скорости поступательного диффузионного перемещения вдоль печи поступающий в печь за счёт

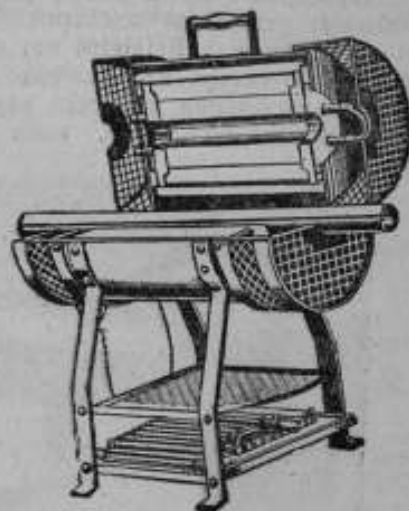


Рис. 3.

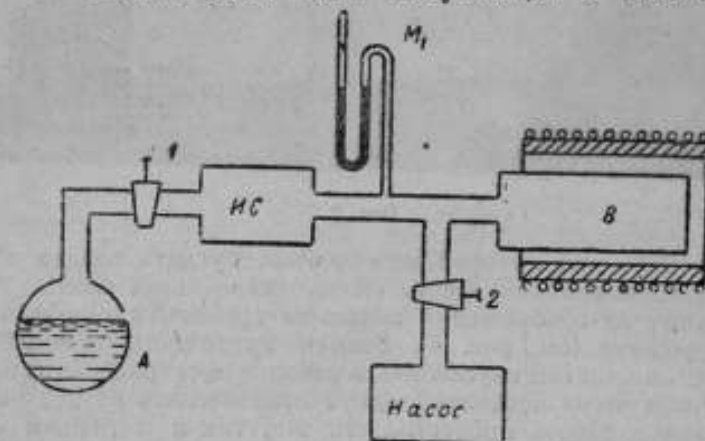


Рис. 4.

диффузии бензин разлагается до конца на ближайших горячих частях печи, не проникая вследствие этого до конца печи.

В результате толщина образовавшегося слоя при работе по

данному способу зависит только от давления паров углеводорода числа впусков углеводорода в печь, температуры печи и отчасти от скорости впуска.

Результаты работы по этому способу приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	Температура печи в °С	Выдержка при рабочей температуре в минутах	Число впусков газа	Давление в мм рт. ст.	Скорость впуска паров бензина в деления шкалы микроманометра	Диаметр основной сопротивляющей трубки в мм	Сопротивление трубки длиной 25 мм в омах
1	1010	Около 15	10	160		5	500—700
2	950	То же	4		50	2	1500—3500
3	1010	•	3+3	около	50	7	700—1500
4	1020	•	1	160	50	7	40000
5	1020	•	1		50	2	11000—300000
6	около 1000	•	2+2	160	50	4,6	1800—3000
6	около 1000	•	2+2		50	2	3900—4300
7	1100	•	15	80		6,5	270—1400

Примечания.

1. Длина печи 600 мм, диаметр рабочего пространства вакуумной печи—12—13 мм.
2. Сопротивления больше 3 кР имеют полупрозрачный проводящий слой.
3. После каждого впуска паров углеводорода в печь давалась выдержка в 30 секунд, после чего они открывались насосом.

Среди трубочек, покрытых проводящим слоем, во время опытов, результаты которых приведены в табл. 2, были трубочки из дважды сплавленного полупрозрачного кварца. Слой, образовавшийся на поверхности фарфоровых трубок, был матовым и имел серебристо-серый цвет, кварцевые трубочки при тех же условиях покрытия их имели на себе гладкий чёрный и блестящий (с серебристым оттенком) полупрозрачный слой.

Согласно литературным данным, слой, образованный на поверхности кварца, должен меньше поддаваться химическим воздействиям, чем слой, образовавшийся на поверхности неглазурированного фарфора. Это вытекает главным образом из того, что контактная поверхность в первом случае будет меньше.

Можно было полагать поэтому, что сопротивление, изготовленное на основе из полупрозрачного кварца, будет более стабильным.

Единственный опыт, произведённый для проверки этого предположения, не подтвердил его.

В табл. 3 приведены результаты ряда измерений двух сопротивлений, изготовленных при одинаковых условиях, но одно-

на неглазурованной фарфоровой трубке, а другое — на трубке из полупрозрачного кварца.

Таблица 3

	Значение сопротивлений					
	до покрытия лаком и старения	после старения при 170°—200°С	после нагрева до 200°С в течение двух часов	По истечении		
				1 суток	37 суток	47 суток
Сопротивление на кварце в омах . .	1500	1753	1798	1933	1880	1830
Сопротивление на фарфоре в омах .	1750	1835	1836	1840	1840	1846

Стабильность сопротивления на основе из полупрозрачного кварца оказалась во много раз меньше стабильности для основы из неглазурованного фарфора.

Этому можно было найти объяснение в том, что чем глаже поверхность основы, тем легче происходит отщепление от неё проводящего слоя, которое, по видимому, происходит за счёт механических натяжений, возникающих при старении данной плёнки. Можно было думать поэтому, что упомянутый выше результат был не случайным, и дальнейшие попытки изготовления сопротивлений на основе из полупрозрачного кварца не производились.

Следует отметить, что на глазурованном фарфоре вообще не удалось получить устойчиво держащегося слоя. При перетирании мягкой тряпкой он стирался почти целиком.

Крупным дефектом при этих работах по науглероживанию сопротивлений является неравномерность в распределении температуры печи. Возможно, что при рациональной конструкции печи и правильном распределении нагревательной намотки можно было бы добиться достаточной для данной цели равномерности температуры печи. Однако в условиях работы с обычными трубчатыми горизонтальными печами с вакуумной вставкой в виде стальной трубы (при работе по схеме рис. 4) температура в печи получается неравномерной, что создаёт неравномерное покрытие сопротивлений, расположенных вдоль оси печи.

У торцов печи температура падает настолько, что трубки, лежащие в этом пространстве, вообще не покрываются проводящим слоем. Поэтому при изготовлении сопротивлений большой длины необходимо, для получения равномерного покрытия, брать печь с максимальной величиной $\frac{l}{d}$, где l — длина печи, а d — диаметр рабочего пространства печи.

Сказанное иллюстрируется графиками (рис. 5 и 6), на которых указано, как меняется сопротивление слоя (на участке длиной 40 мм) вдоль по оси печи, для печи длиной 600 и 900 мм. При наличии печи длиной в 900 равномерность

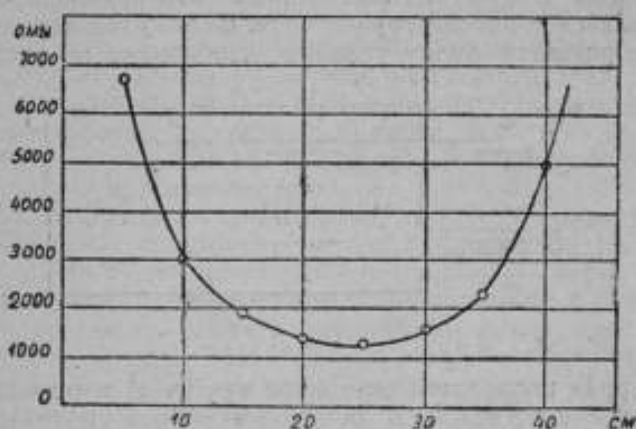


Рис. 5.

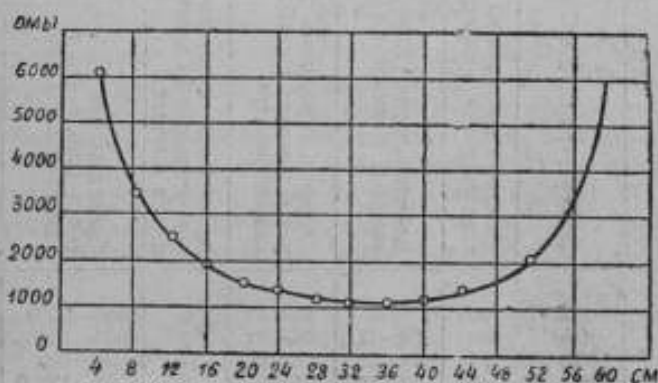


Рис. 6.

покрытия значительно возрастает. Оба графика относятся к способу работы по схеме рис. 1.

В табл. 4 приведены результаты работы с этой печью (по схеме рис. 4). Печь была изготовлена в лаборатории специально для данной цели и представляла собой обычного типа горизонтальную трубчатую печь с габаритами: длина 900 мм, диаметр рабочего пространства 60 мм. Описанные выше опыты работы по схеме рис. 4 были проведены со стальным вкладышем

малого диаметра. При увеличении диаметра печи до 60 мм неожиданно оказалось, что при работе по этому способу трубочки остаются совершенно непокрытыми проводящим слоем. Поэтому пришлось перейти на старый способ проточного течения паров углеводорода с тем видоизменением, что подвод и отвод газа осуществлялся с одной стороны печи. Схема стального вкладыша, удовлетворяющего этому условию, изображена на рис. 7.



Рис. 7.

углеводорода подводятся по тонкой трубке A и отводятся через выходное отверстие B. В остальном работа протекает так же, как по схеме рис. 1.

Таблица 4

№ опыта	Применяемый углеводород	Температура печи в °С	Выдержка при рабочей температуре в минутах	Давление паров углеводорода в мм рт. ст.	Скорость течения паров в делениях шкалы микроманометра	Время пропускания паров углеводорода через печь в минутах	Сопротивление трубки диам. 8 мм и длиной 33 мм в омах	Примечание
1	бензин	900	90	22	15—40	5	1000—2000	
2	"	930	80	18—11	45—30	20	600—1000	
3	"	900—930	75	14—09	21—18	34	300—600	
4	"	870—900	45	23 10	45—25	25	8000—12000	
5	бензол	920	60	20—17	100	5	1000—2000	
6	"	930	60		50	4	2500—3000	имелась небольшая течь воздуха
7	"	930	около 1 часа	12	15—20	20	900—1200	
8	"	930	60		50	1	700	прозрачные пленки
9	"	930	60		15—20	15		
10	"	910	60	14—12	40—50	2	10000—20000	
11	"	930	60	10—15	15—30	12	2000—3000	
12	толуол	870	60	—	30	5	1500—2500	
13	"	890	60	—	30	7	700—1300	
14	"	910	30	12	30	8	600—1000	

Большое значение имеет расположение фарфоровых трубочек внутри печи. Для получения равномерного покрытия стенки трубок должны омываться со всех сторон струёй газа, имеющей всюду одинаковую скорость и примерно одинаковую концентрацию паров углеводорода. Для получения такого потока трубочки должны располагаться в печи как обоймы в барабане револьвера. Ещё лучше закладывать таким образом в печь длинные фарфоровые трубки и после науглероживания разрезать их на части нужной длины. Такой метод обеспечивает наибольшую равномерность в обтекании газом поверхности трубки. Недостатком его является то, что при разрезании трубок на части легко повредить нарощенный слой.

Следует отметить, что при соприкосновении друг с другом двух фарфоровых поверхностей они покрываются слоем углерода, который будет только более тонким в месте касания. При соприкосновении фарфоровой поверхности с поверхностью из стали поверхность фарфора совершенно не покрывается углеродом в месте касания. Поэтому расстояние между наружной поверхностью науглероживаемых фарфоровых трубочек и ближайшими стальными предметами должно быть не менее 2—3 мм для обеспечения равномерности покрытия.

III. НАРЕЗКА

Науглероженные трубочки стандартного размера (длина 40 мм, диаметр—8 мм) имеют сопротивление от 50 Ω до 10 kΩ. Все сопротивления большей величины могут быть изготовлены только путём прорезания винтовой канавки на корпусе сопротивлений. Таким образом, достижимый предел омической величины сопротивлений, изготовленных данным методом, зависит от качества выполнения нарезки. Сопротивление ленточки из проводящего материала, образующейся на теле сопротивления в результате нарезки,

$$R = \rho \frac{l}{x} \quad (1)$$

где l —длина ленты;
 x —ширина ленты;
 ρ —поверхностное удельное сопротивление проводящего слоя.

Легко видеть, что $l = \pi dn = \pi d \frac{L}{t}$ (2)

где d —диаметр трубки;
 n —число витков (ниток) нарезки;
 L —длина нарезанной части трубки;
 t —шаг нарезки;

$$x = t - y, \quad (3)$$

где y — ширина риски.

Подставляя значения t и x в выражение (1), получаем для R выражение вида

$$R = \pi \rho d L \frac{1}{t(t-y)} \quad (4)$$

Величина $\pi d L$ есть наружная поверхность трубки S , поэтому выражение (4) может быть также написано в виде

$$R = \rho S \frac{1}{t(t-y)} \quad (5)$$

Из формулы (5) отчетливо видно, что при заданных размерах сопротивления и при использовании слоя с максимальным достижимым удельным поверхностным сопротивлением дальнейшее увеличение R может быть достигнуто только за счет шага нарезки t и соотношения между шагом t и шириной риски y .

Величина R обратно пропорциональна (в первом приближении) квадрату t и поэтому за счет уменьшения шага можно сильно увеличить значение R . Однако, очевидно, что t не может быть меньше y и, следовательно, от значения y зависит в конечном счете максимальная величина сопротивления R .

На первый взгляд может показаться, что при любом шаге t можно как угодно увеличить значение R , уменьшая величину разности $t - y$, т. е. уменьшая ширину проводящей ленточки. На самом деле это не так. Существует предельное значение для ширины проводящей ленточки, уменьшать которое по техническим причинам оказывается невозможным и которое колеблется в интервале 0,2—0,8 мм, в зависимости от способа нарезки, качества материала и размеров фарфоровой трубки.

При нарезке фарфоровых трубок края прорезанной канавки несколько выкрашиваются вследствие хрупкости фарфора. Если ленточка проводящего материала взята слишком узкой, то выкрашивание фарфора сделает её неравномерной по ширине и может даже привести к полному разрыву проводящего слоя. Следовательно, для получения сопротивления наибольшей величины необходимо делать нарезку с очень тонкой и чистой (в смысле выкрашивания материала) рисккой. Выполнение такой нарезки сопряжено с значительными техническими трудностями. Для изготовления сопротивления до 1 МΩ вполне достаточна риска шириной 0,4—0,5 мм, поэтому не имеет смысла при изготовлении сопротивлений этой величины стремиться к получению риски шириной меньше 0,4 мм. Для изготовления сопротивлений от 1 до 10 МΩ желательно довести ширину риски до величины 0,2—0,3 мм.

Нарезку сопротивлений можно выполнить на любом станке, позволяющем осуществить винтовое движение обрабатываемой фарфоровой трубочки относительно резца.

Во ВНИИМ нарезка производилась на токарном станке. Способы нарезки следует различать по типу резцов; были произведены опыты нарезки как неподвижными резцами, так и вращающимися дисками. Ниже приводятся результаты этих опытов.

А. Нарезка неподвижными резцами

В этом случае обработка фарфоровых трубок ничем не отличалась от обычного способа нарезки резьбы на токарном станке. В супорте токарного станка зажимался неподвижный (относительно супорта) резец. В качестве материала для резца были применены сверхтвёрдые сплавы (видий, победит) и алмазы. Резцы из сверхтвёрдых сплавов (как отечественного происхождения, так и изготовленные фирмой „Крупп“) оказались совершенно непригодными для этой цели: они тупились после каждых двух оборотов фарфоровой трубки. Алмазные резцы легко режут фарфор, но слишком быстро изнашиваются, поэтому хотя осуществление нарезки с помощью алмазного резца возможно, но экономически совсем невыгодно. Вследствие неизбежных неровностей и эллиптичности трубки стружка, снимаемая алмазом, неодинакова в различных частях трубки, и это приводит к тому, что глубина и ширина риски сильно колеблется. Следует считать поэтому, что нарезка неподвижным резцом не может дать хороших результатов и совершенно непригодна при серийном производстве сопротивлений.

Б. Нарезка шлифующими дисками

Значительно лучший результат получается при замене неподвижного резца вращающимся диском.

При резке и шлифовании резьбы на стеклянных трубках с успехом применяются медные и стальные диски, захватывающие при вращении эмульсию с карборундовой пылью. Этот метод был испробован и для нарезки фарфоровых трубок, но не дал положительных результатов, так как прорезаемая канавка засаливалась материалом диска и не везде был хорошо снят проводящий слой.

Можно думать, что хороший результат мог бы быть достигнут при применении алмазных пил в виде металлических дисков с начеканенной на режущую кромку алмазной крошкой. Однако такой опыт не был осуществлён. Удовлетворительный результат был получен при нарезке сопротивлений вращающимися шлифовальными камнями. Были использованы так называемые „прорезные камни“ со следующими параметрами: диаметр 65—80 мм, толщина 0,5—2 мм, зернистость около 150, режущий материал — карборунд, вязка — вулканиговая или бакелитовая.

Окружная скорость резания была порядка 15—20 м/сек. Режущая кромка камня заправлялась алмазом под углом, зависящим от необходимой толщины риски. При прорезании канавки шириной 0,3 мм приходится заправлять камень после обработки каждого сопротивления.

IV. УСТРОЙСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВЫВОДОВ

Устройство металлических выводов для включения сопротивления в электрическую цепь осуществлялось различными способами, причём все они дали удовлетворительные результаты. Ниже приводятся краткие описания их с указанием сравнительных достоинств и недостатков.

Наращивание металла (меди) на концы сопротивлений электролитическим путём

Наращивание меди. Рецепт электролита для ванны: дистиллированной воды 500 см³, медного купороса 100 г, серной кислоты — 15 г. Плотность тока 1,3 А/дм². Для каждой покрываемой трубочки был использован отдельный анод в виде проволочного кольца, в центре которого располагалась трубка. Время покрытия порядка 2—3 часа.

Облуживание омеднённых концов сопротивлений. Тщательно промытое после электролиза сопротивление опускается в 50% раствор канифоли в спирте, а затем в ванну с расплавленным оловом, и к залуженным концам сопротивления припаиваются паяльником медные провода.

Этот способ даёт в высшей степени надёжный и совершенный контакт и поэтому его следует особенно рекомендовать при изготовлении низкоомных сопротивлений (без нарезки).

Стягивание концов сопротивлений пружинящими латунными хомутиками

Этим способом нашей промышленностью изготавливаются сопротивления Каминского и сопротивления типа СС. Изготовление подобных наконечников кустарным образом (без штампов) требует большой затраты времени и редко даёт хорошие результаты.

Надевание металлических колпачков

Можно выточить металлические колпачки с диаметром внутреннего отверстия, большим (примерно на 0,1 мм) наружного диаметра сопротивления, и укрепить их на концах сопротивления на замазке из графита и бакелитового лака. Такой метод был с успехом применён при изготовлении высокоомных сопротивлений (10 кΩ).

Удовлетворительный результат даёт также заливка колпачков (из слюды) в изготовленных для этой цели разъёмных стальных

опоках. Толщина стенок колпачка берется равной 1 мм. Длина колпачка 5—6 мм.

Такой способ безусловно непригоден для сопротивлений, подвергающихся значительным перегрузкам.

V. Подгонка сопротивлений

Подгонка сопротивлений без нарезки (до 5000 Ω) выполнялась путём соскабливания части проводящего слоя.

При подгонке сопротивлений, больших 5000 Ω и вследствие этого снабжённых нарезкой, следует руководствоваться измерением величины сопротивления в процессе самой нарезки. Точная подгонка нарезанных сопротивлений осуществлялась путём перетирания нарезанного сопротивления ватой с шлифующим порошком.

Шаг нарезки t определяется из формулы (4), решая которую относительно t , имеем:

$$t = \frac{y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{y^2 + \frac{4\pi\rho d^2 L}{R}} \quad (6)$$

Обычно бывает известна не величина удельного поверхностного сопротивления слоя ρ , а сопротивление трубки без нарезки

$$R_1 = \rho \frac{L}{\pi d},$$

откуда

$$\rho = \frac{\pi d}{L} R_1.$$

Подставляя значение ρ в формулу (6), мы получим для вычисления шага t в этом случае формулу

$$t = \frac{y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{y^2 + \frac{4\pi^2 d^2 R_1}{R}}.$$

VI. ПОКРЫТИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИЗОЛИРУЮЩИМ ЛАКОМ И СТАРЕНИЕ

В процессе работы применялось много различных способов покрытий сопротивлений изолирующим лаком и последующего старения, однако окончательная методика ещё не разработана ввиду большой сложности данного вопроса. От метода покрытия сопротивлений в значительной мере зависит их стабильность. Причины этого кратко изложены в докладе автора на конференции, происходившей в ноябре 1939 г. в ВНИИМ.

Хорошие результаты дали следующие методы покрытий.

Сопротивления от 50 до 500 Ω покрываются окунанием в жидкую эмалевую краску.

После окуивания надо дать стечь излишкам краски и сопротивлению просушить в течение суток при комнатной температуре и 30 часов — при температуре 80—100° С.

Сопротивления от 0,5 до 5 МΩ покрываются окуиванием в изоляционный копаловый масляный лак, просушиваются 24 часа, нагреваются до 140° С и выдерживаются при этой температуре два-три часа. После этого следует повторное покрытие, новая сушка в течение 24 часов и повторное нагревание до 140° С с выдержкой в течение 20 часов.

Сопротивления от 5 МΩ и выше покрываются феноло-тунговым лаком (бакелит + тунговое масло).

Старение надо проводить так же, как и в случае покрытия обычным масляным лаком.

Из приготовленных таким способом сопротивлений на заводе „Эталон“ собрано несколько высокоомных магазинных сопротивлений, над которыми ведутся наблюдения для выяснения степени их постоянства.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Юргенс. ИЭСТ. 1939, № 3.
2. R. Hofmann и M. Hofmann. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft. 1926, т. 59, № 10.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Е. К. Вессо-Адо. Схемы сличений эталонных катушек сопротивления	3
Б. М. Яновский. Об установлении нормальных образцов магнитной восприимчивости пара- и диамагнитных тел	34
Е. Г. Шранков. Погрешности измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов	55
К. П. Широков. О поверке потенциометра по Диссельгорсту	72
Т. Н. Розе. Остывание ферромагнитных материалов в постоянном магнитном поле	96
Г. К. Ягода. Расчет магнитной проводимости подковообразных магнитов	106
<u>А. А. Юргенс.</u> Методы изготовления стабильных высокоомных сопротивлений	118

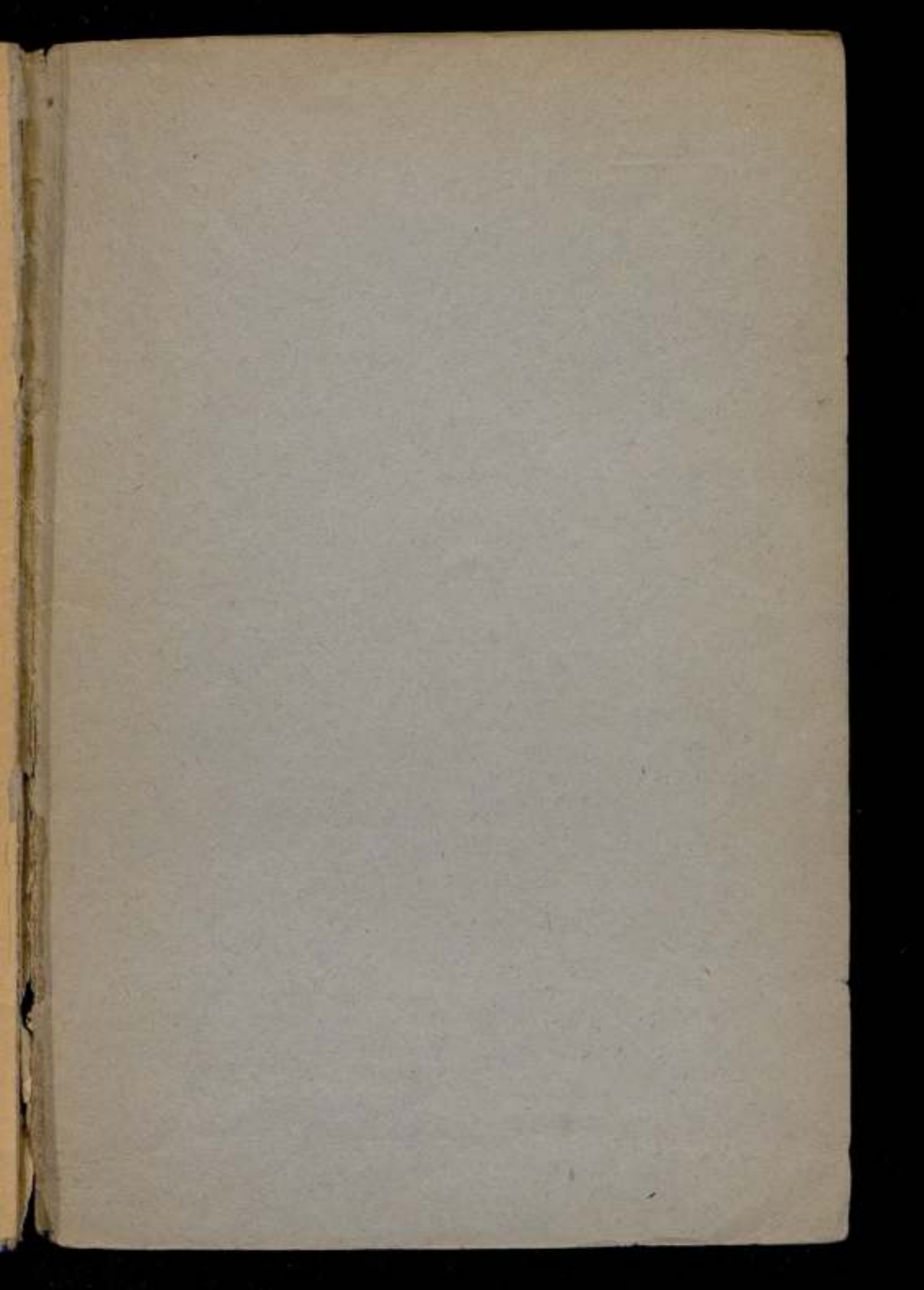


Корректор *Н. А. Кноле.*

Техн. редактор *А. И. Конторович.*

МО 3871. Подп. к печати 26/VII-47 г. Объем 8 $\frac{1}{4}$ печ. л. Тираж 1200 экз. Уч.-изд. 9,5
1-я Типография Управления полиграфии и издательства

Отпечатано с готовых матриц во 2-й т.-л. Гидрометеонздата.
Прачечный пер., 6. Зак. № 1278.



Цена 8 руб.

Склад издания:
Ленинград 5. Международнѣѣ, 19.
ВНИИМ