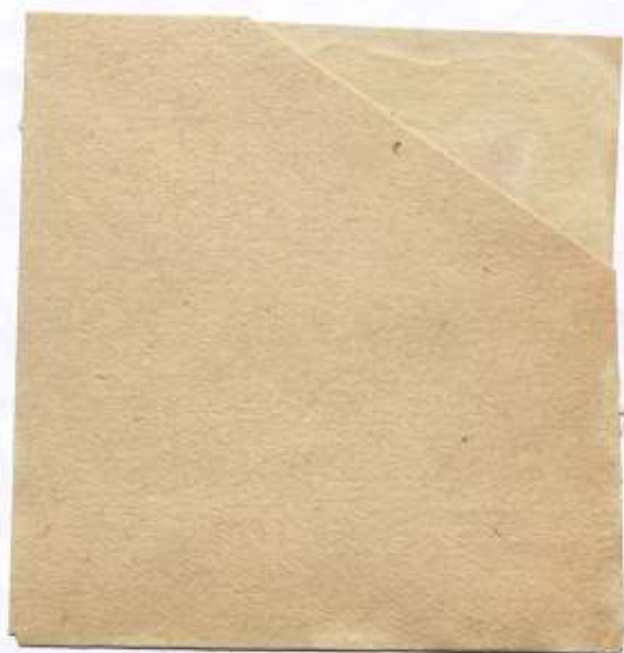


972
КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

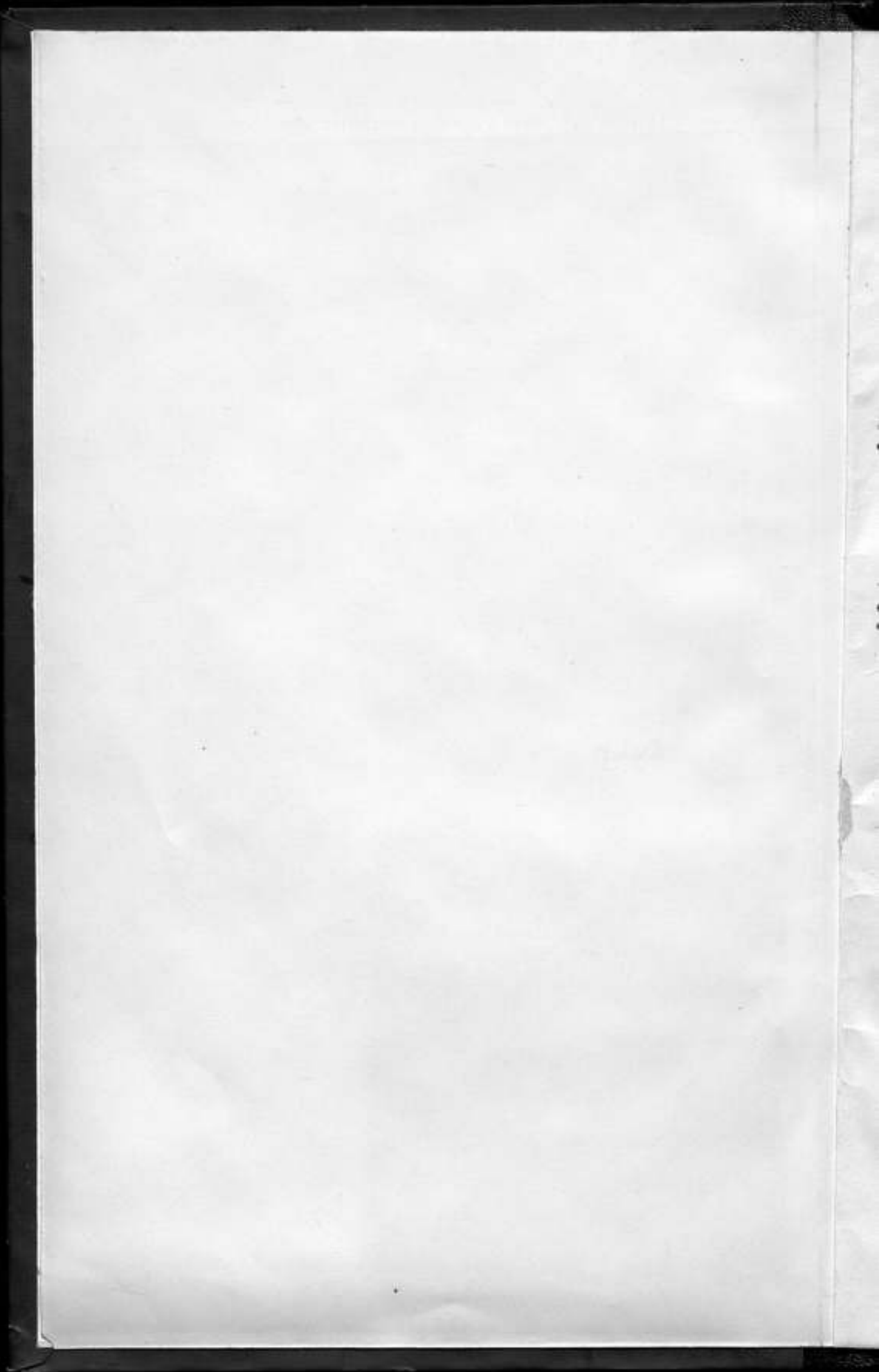
ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 24(84)

МАШГИЗ • 1954



122



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 24 (84)

Под редакцией
канд. техн. наук Е. Т. ЧЕРНЫШЕВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1954 ЛЕНИНГРАД

96601

В статьях сборника рассматриваются новые образцовые электронизмерительные приборы, приводятся исследования в области разработки новой методики и повышения точности электрических измерений.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников, работающих в области электротехнической промышленности, а также может быть полезен студентам энергетических вузов.

Ответственный редактор — директор ВНИИМ
канд. техн. наук *М. Ф. Юдик*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Редакция литературы по конструированию
и эксплуатации машин
Заведующий редакцией инж. *Ф. И. Фетисов*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник посвящается работам ВНИИМ в области электрических и магнитных измерений как на постоянном, так и на переменном токе.

В статье проф. К. К. Аглинцева рассматриваются некоторые вопросы теории погрешностей измерительной аппаратуры.

Погрешностям электроизмерительных приборов при повышенных частотах и методике их поверки посвящены статьи кандидатов технических наук М. С. Каяндер, К. П. Широкова и А. Я. Безикович.

Вопросы применения и поверки электроизмерительной аппаратуры при частотах звукового диапазона являются весьма актуальными, и появление этих статей, безусловно, должно представить интерес для инженеров-электриков и научных работников, занимающихся опытными исследованиями в области электротехники.

Особо следует отметить работу К. П. Широкова, в которой приводятся исчерпывающие сведения по вопросам проведения поверок электроизмерительной аппаратуры в звуковом диапазоне.

Работа канд. техн. наук Г. К. Яголы по измерению потерь знакомит читателя с опытом создания новой конструкции ваттметровой установки для испытания образцов ферромагнитных материалов малой массы (2 кг).

Вопросы методики точных электрических измерений нашли свое отражение в двух статьях канд. техн. наук К. П. Широкова, посвященных методике измерений на компенсаторах и двойных мостах постоянного тока. Эти работы явятся ценным материалом для инженерно-технических работников, а также для лабораторий, занимающихся соответственными вопросами.

В статье канд. техн. наук Г. К. Яголы приводится описание конструкции, предложенной автором для измерения магнитоотрицания в постоянных магнитных полях.*

Вопросам определения магнитной восприимчивости слабо магнитных материалов весовым методом посвящены две статьи канд. техн. наук Е. А. Соколовой. В работе „Определение магнитной восприимчивости химически чистых кадмия, сурьмы, серы и некоторых технических материалов“ приводятся ценные справочные данные о магнитной восприимчивости ряда материалов, применяемых в приборостроении, которые представляют интерес для конструкторов электро- и магнитоизмерительной аппаратуры.

Редактор

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page. The text is arranged in several paragraphs and is difficult to decipher due to its low contrast and blurriness.

О ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Классическая теория обработки результатов измерений основана на следующих положениях [1]:

1) наиболее достоверное значение, которое мы можем приписать измеряемой величине на основании ряда измерений одинакового достоинства, есть среднее арифметическое из полученных значений (стр. 103)¹. М. Ф. Маликов по этому поводу пишет: „правильность принципа арифметического среднего подтверждается полным согласием опытных данных, его применение не приводит ни к каким внутренним противоречиям“ (стр. 102);

2) остаточные погрешности при достаточно большом числе измерений хорошо описываются законом нормального распределения Гаусса (стр. 111);

3) погрешность результата при увеличении числа измерений n изменяется по закону $1:\sqrt{n}$ (стр. 136). Как известно, при измерениях обнаруживается присутствие случайных погрешностей, т. е. погрешностей неопределенных по своей величине и по своей природе; в их появлении не наблюдается каких-либо закономерностей (стр. 88). Их причинами могут быть: недостатки измерительной аппаратуры, несовершенство органов чувств наблюдателей, неконтролируемые изменения условий измерения, вызывающие некоторую нестабильность измеряемой величины, и т. д.

Классическая метрология считает, что „непременным условием хорошего измерения должно быть получение, наряду с совпадающими, несколько различающихся друг от друга результатов, при самом тщательном выполнении измерений“ (стр. 96). Этот разброс результатов отдельных измерений объясняется указанными выше источниками случайных погрешностей.

Выражение для средней погрешности результата (стр. 136—137)

$$\mu = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

хотя и вытекает из принципа арифметического среднего и закона нормального распределения погрешностей, однако не может считаться правильным, так как на основании ф-лы (1) можно прийти к физически нелепому выводу, что с помощью плохого прибора при большом числе измерений может быть получен результат очень высокой точности. Во всяком случае можно отметить, что на основании ф-лы (1) точность измерений может оказаться завышенной.

¹ Ссылки в скобках указывают страницы труда М. Ф. Маликова „Основы метрологии“, ч. 1, Москва, 1949.

Чтобы избежать этого ложного вывода, нужно тщательно проанализировать процесс измерений и механизм образования погрешности. Очевидно нужно опираться не только на теорию вероятности, но также и на физическую сущность процесса измерений.

Основное значение имеет вопрос о предельной чувствительности измерительной аппаратуры; следует различать принципиальную и практическую стороны вопроса. С принципиальной стороны предельная чувствительность измерительной аппаратуры определяется молекулярным строением вещества и флуктуациями, обусловленными тепловым движением. Практическая чувствительность зависит от конструкции аппаратуры и обычно на один или даже на несколько порядков ниже принципиально достижимой чувствительности.

Обозначим через $2a$ цену деления прибора (или такую дробную часть деления, которая может быть отсчитана). Пусть отсчет по прибору будет A . Выбор значения A из значений A , $A + 2a$, $A - 2a$ значит, что отсчет должен лежать между $A - a$ и $A + a$, причем в этих пределах все значения равно возможны. Отношение $\frac{A}{a}$ может быть названо разрешающей силой прибора, а величина a — пределом разрешения; иногда величина a называется шагом шкалы. Величина a определяет практически достижимую чувствительность прибора.

Вернемся к рассмотрению закона нормального распределения. С формальной стороны можно отметить, что вероятно любой вывод этого закона содержит какое-либо необоснованное с физической точки зрения предположение.

Например, если исходить из аксиом случайности и распределения (стр. 107), то надо признать, что аксиома распределения перестает быть справедливой, как только мы подходим к погрешностям порядка a . В этих пределах равновероятна любая погрешность от $-a$ до $+a$.

Другой вывод закона нормального распределения основан на допущении, что случайная погрешность составляется из очень большого числа равных малых погрешностей. Очевидно к этим погрешностям надо добавить еще погрешность $\pm a$, не очень малую по величине.

При обработке результатов измерений нужно принять во внимание, что предел разрешения является причиной неопределенности каждого отсчета в пределах $\pm a$. По этой причине кривая нормального распределения погрешностей должна быть заменена ступенчатой ломаной линией (гистограммой); ширина каждой полосы гистограммы равна $2a$. Переход от плавной кривой к ломаной линии — операция, прямо противоположная той, которая предельвается при выводе закона нормального распределения [2].

Если величина a очень мала, то ступенчатая ломаная линия практически не отличается от плавной кривой и все правила классической метрологии остаются справедливыми. Совершенно иная картина получается при сравнительно больших значениях величины a .

В пределах от -3σ до $+3\sigma$ заключено $\frac{6\sigma}{2a}$ полос гистограммы, причем при сравнительно больших значениях величины a это число будет невелико. В то же время отношение $\frac{6\sigma}{2a}$ будет также и числом различающихся друг от друга отсчетов для серии измерений с данной степенью разрешения. Истинное, но неизвестное нам значение измеряемой величины лежит где-то внутри одной из полос гистограммы. Ясно, что при увеличении числа измерений отсчеты, соответствующие

данной полосе гистограммы, будут сохранять неопределенность в пределах величины порядка a .

Таким образом, минимально достижимое значение погрешности будет определяться тем, что истинное значение измеряемой величины может оказаться сдвинутым относительно границы или центра соответствующей полосы гистограммы на величину порядка a .

Окончательно мы приходим к выводу, что погрешность результата измерений получается от наложения двух факторов: случайные погрешности измерений и предельная разрешающая способность измерительной аппаратуры. Первый фактор дает для погрешности результата величину $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$; роль второго фактора сводится к тому, что полосы гистограммы случайного распределения результатов отдельных измерений могут быть сдвинуты относительно истинного значения измеряемой величины на величину порядка a . Для суммарной погрешности можно принять выражение

$$\mu = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n} + a^2}. \quad (2)$$

Если величина a будет малой, то для погрешности результата получается обычное выражение

$$\mu = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Если a будет не слишком малой величиной, а число измерений n — велико, то

$$\mu = a.$$

Принципиально неправильный подход к процедуре обработки результатов измерений, приводящий к преуменьшению фактически допускаемой погрешности измерений, заключается в пренебрежении погрешностью, обусловленной разрешающей способностью измерительной аппаратуры.

Соображения, изложенные выше, показывают, что для правильной оценки действительной погрешности серии измерений необходимо учитывать влияние разрешающей способности приборов. Естественно, что здесь не могут быть даны сколько-нибудь общие указания; каждый отдельный прибор или метод измерений обладает характерными особенностями и задача экспериментатора и заключается в том, чтобы в каждом отдельном случае суметь разобраться в этих особенностях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазинов М. Ф., Основы метрологии, ч. 1, Москва, 1949.
2. Уорсинг А. и Геффнер Дж., Методы обработки экспериментальных данных, Издательство иностранной литературы, Москва, 1949.

М. С. КАЯНДЕР

ПОГРЕШНОСТИ АМПЕРМЕТРОВ И ВОЛЬТМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Для измерения тока и напряжения в диапазоне звуковых частот применяются показывающие приборы различных систем, а именно: электродинамической, электромагнитной, термоэлектрической, электростатической, выпрямительной, а также ламповые приборы. Ни одна из этих систем не дает в настоящее время возможности создания приборов высокого класса точности для всего диапазона звуковых частот. Для первых двух систем этому препятствуют свойственные им значительные частотные погрешности, для остальных указанных систем можно считать, что характеристики их мало зависят от частоты в звуковом диапазоне, но им присущи другие погрешности, ограничивающие их точность в лучшем случае классом 1,0+1,5.

Для создания точных и надежных приборов этих частотно независимых систем необходимо в первую очередь усовершенствовать такие основные элементы, как термопреобразователи, выпрямители и другие конструктивные детали, от которых зависит надежность градуировки и стабильность прибора.

Показания приборов выпрямительной системы, имеющей весьма широкое распространение для измерений при повышенной частоте, сильно зависят от формы кривой измеряемого тока. Следует также отметить, что показания этих приборов нельзя считать во всех случаях не зависящими от частоты. Опыт показывает, что если детекторный прибор находится вблизи проводов, несущих большой ток повышенной частоты, то стрелка может отклоняться, даже если прибор не включен в цепь. Это объясняется наличием токов, индуцированных магнитным полем высокой частоты во внутренней цепи прибора и выпрямленных его детектором. Величина этих индуцированных токов прямо пропорциональна частоте переменного магнитного поля и может вызвать погрешности, превышающие 100%.

Наряду с усовершенствованием мало зависимых от частоты приборов, которые в настоящее время еще не могут обеспечить точных и надежных измерений, имеется и другой путь, а именно тщательное исследование частотных погрешностей электромагнитных и электродинамических приборов с целью возможного уменьшения этих погрешностей.

В электромагнитном отделе ВНИИМ с 1949 г. автором настоящей статьи велась работа по изучению возможности применения выпускаемых промышленностью приборов переменного тока для точных измерений при повышенной частоте, которая дала ряд практических результатов. Экспериментальное исследование приборов производилось

с помощью термоэлектрического метода компарирования [1], который позволяет заменить измерение переменного тока или напряжения измерением равных по действующему значению величин постоянного тока.

Термоэлектрический метод компарирования позволяет определять частотные характеристики прибора с большой точностью, так как погрешность измерения при этом не превышает 0,05% от верхнего предела измерения прибора.

Частотной характеристикой измеряемого прибора можно назвать зависимость между его относительными погрешностями γ (или поправками к показаниям Δ) и частотой переменного тока f .

Основными источниками частотных погрешностей для электромагнитных и электродинамических приборов являются:

- 1) индуктивность катушек прибора;
- 2) взаимная индуктивность между катушками (для электродинамических приборов);
- 3) вихревые токи в катушках и металлических деталях прибора;
- 4) влияние внешних магнитных полей повышенной частоты;
- 5) емкостные токи в катушках;
- 6) реактивность сопротивлений в цепи прибора;
- 7) поверхностный эффект и эффект близости в катушках прибора.

Все указанные явления не в одинаковой степени действуют в приборах различных конструкций и назначения. При правильном изготовлении катушек и сопротивлений последние три явления при звуковых частотах могут не вызывать заметных погрешностей.

Влияние внешних магнитных полей в значительной степени уменьшается при экранировании или аstaticком устройстве системы прибора.

Вихревые токи вызывают погрешности, зависящие от частоты, во всех приборах, имеющих металлические детали, но влияние их различно для различных по назначению и конструкции приборов. Вихревые токи являются основной причиной частотной погрешности амперметров, не имеющих шунтированных катушек, т. е. электродинамических миллиамперметров и всех амперметров электромагнитной системы.

В электродинамических приборах с шунтированной подвижной катушкой кроме погрешностей, вызванных вихревыми токами, возникают значительно большие погрешности, обусловленные взаимной индукцией между катушками прибора, которые и определяют его частотную характеристику.

В вольтметрах основной причиной частотной погрешности является индуктивность катушек, вызывающая возрастание общего сопротивления прибора при увеличении частоты, что при измерении напряжения сказывается значительно больше, чем дополнительные моменты от вихревых токов.

Как правило, вольтметры имеют худшие частотные характеристики, чем амперметры.

Рассмотрим подробнее частотные характеристики приборов, для удобства группируя их по назначению и начиная с тех, которые имеют наименьшие частотные погрешности.

1. Миллиамперметры электродинамической системы

Сюда относятся приборы, измеряющие сравнительно небольшой ток, у которых подвижная и неподвижная катушки соединены последовательно. Для выяснения характера частотной погрешности, вызы-

ваемой вихревыми токами, индуктированными в металлических деталях прибора, можно заменить отдельные цепи этих паразитных токов одной общей замкнутой цепью с некоторыми эквивалентными параметрами: M_n —коэффициентом взаимной индукции между катушками прибора и эквивалентной цепью вихревых токов; R_n —активным сопротивлением этой цепи и L_n —ее индуктивностью.

Тогда можно считать, что измеряемый ток I , проходящий по катушкам прибора, индуктирует в замкнутой паразитной цепи э. д. с. E_n , отстающую от этого тока на 90° . Величина ее будет

$$E_n = I\omega M_n.$$

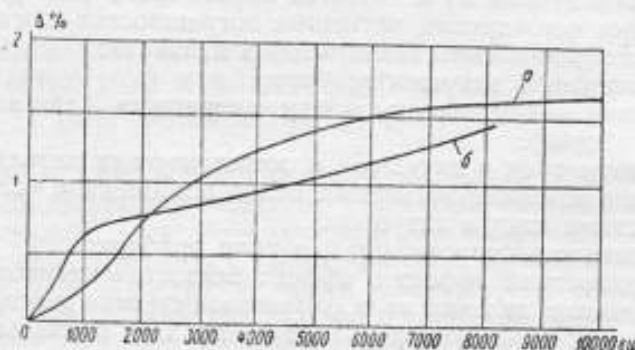


Рис. 1. Зависимость поправок от частоты для электродинамических амперметров на малые токи:
 а—для статического амперметра типа ЭДА;
 б—для экранированного прибора фирмы Вестон.

Ток I_n в паразитной цепи определится из выражения

$$I_n = \frac{I\omega M_n}{\sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}}.$$

Ток I_n отстает от индуктированной э. д. с. E_n на угол φ_n . Создаваемый этим током паразитный момент

$$D_n = KI \cdot I_n \cos [-(90 + \varphi)] = -KI \cdot I_n \sin \varphi_n.$$

Подставляя значения для I_n и $\sin \varphi_n = \frac{\omega L_n}{\sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}}$, получаем

$$D_n = -KI^2 \frac{M_n L_n \omega^2}{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}. \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что дополнительный момент всегда противодействует основному и при небольших частотах возрастает с увеличением частоты примерно по параболе, пока активное сопротивление паразитной цепи велико сравнительно с индуктивным. При больших частотах, когда активным сопротивлением цепи вихревых токов можно пренебречь по сравнению с индуктивным, дополнительный момент почти не зависит от частоты и, как следует из ур-ния (1), пропорционален

$$D = \frac{M_n}{L_n}. \quad (2)$$

Вихревые токи индуктируются в основном неподвижными катушками прибора, индуктивность которых больше индуктивности подвижной, поэтому изменение положения подвижной катушки не должно заметно сказываться на погрешности прибора. Эти рассуждения подтверждаются экспериментальными данными, приводимыми нами ниже.

На рис. 1, кривая *a* представлена экспериментально полученная для электродинамического миллиамперметра на 250—500 *ма* типа ЭДА зависимость поправок от частоты измеряемого тока.

Сравнительно большие поправки объясняются тем, что катушки этого прибора укреплены в массивной стойке из дюралюминия. Опыт показал, что представленная зависимость (рис. 1, кривая *a*) относительной поправки Δ от частоты f справедлива для всех показаний прибора типа ЭДА, для обоих пределов измерения¹.

Кривая *b* (рис. 1) снята для экранированного электродинамического миллиамперметра и имеет несколько другой характер, объясняющийся уменьшением магнитной проницаемости экрана, в который заключена система прибора, при увеличении частоты. Если L — индуктивность катушек прибора, а K — коэффициент связи между ними и цепью вихревых токов, то

$$M_{\text{в}} = K\sqrt{L \cdot L_{\text{в}}}.$$

Подставляя выражение для $M_{\text{в}}$ в ф-лу (2), получаем

$$D = \frac{M_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu}}. \quad (3)$$

Магнитная проницаемость μ ферромагнитных сплавов падает с частотой, поэтому дополнительный момент, создаваемый вихревыми токами в экране, увеличивается, а следовательно, возрастает погрешность прибора.

2. Электромагнитные амперметры

Основной причиной частотной погрешности этих приборов являются вихревые токи в сердечнике и металлических деталях прибора. Дополнительный момент, создаваемый вихревыми токами, может быть определен совершенно так же, как и в первом случае, причем он зависит от изменения магнитной проницаемости сердечника при увеличении частоты. Величина погрешности обычно будет большей, чем у электродинамических амперметров с последовательной схемой, так как больше коэффициент связи катушек с цепью вихревых токов в сердечнике, который находится непосредственно в поле, возбуждаемом катушками. Из выражения (3) очевидно, что чем большей магнитной проницаемостью обладает материал сердечника, тем частотные погрешности прибора будут меньше. При изменении положения стрелки по шкале меняется и коэффициент связи между цепью измеряемого и цепью вихревых токов. Поэтому погрешность электромагнитных приборов может быть различна для разных точек шкалы и обычно возрастает с увеличением отклонения.

На рис. 2 представлены частотные характеристики для электромагнитного амперметра типа АСТ, предназначенного для 50 *гц*, и Э-51, предназначенного для 1000 *гц*.

Так как частотные погрешности не очень велики, то электромагнитные приборы, градуированные при какой-либо одной частоте (500, 1000, 2500 или 8000 *гц*), выпускаются нашей промышленностью.

¹ Поправка в делениях будет различна для различных точек шкалы.

На рис. 3 представлена частотная характеристика амперметра электромагнитной системы типа ВЧА с пределом измерения 5 а, предназначенного для частоты 8000 гц. Эта характеристика отличается

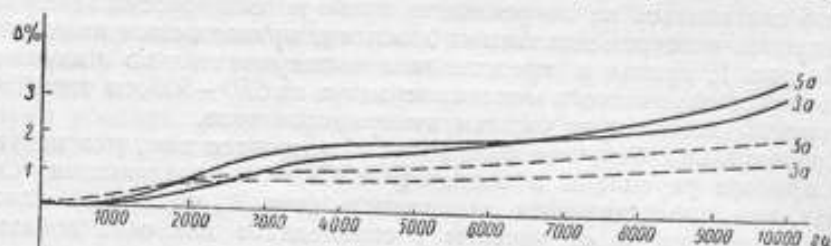


Рис. 2. Зависимость поправок от частоты для амперметров электромагнитной системы с пределом измерения 5 а:
 — для амперметра типа АСТ;
 - - - для амперметра типа Э-51.

от характеристик других приборов электромагнитной системы только номинальной частотой, т. е. той частотой, при которой произведена градуировка прибора. Погрешности, вызванные вихревыми токами,

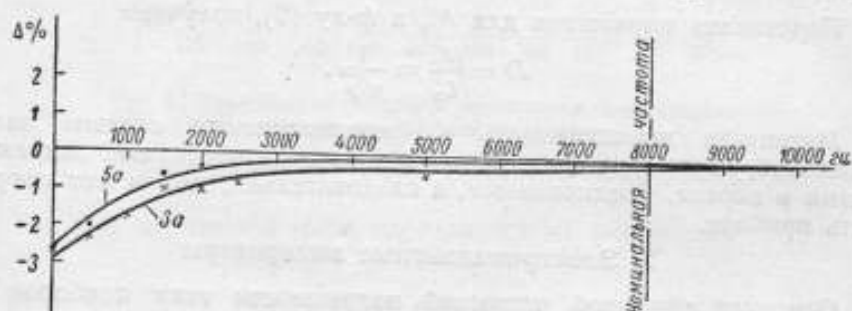


Рис. 3. Зависимость поправок от частоты для электромагнитного амперметра типа ВЧА на 5 а, предназначенного для 8000 гц.

можно заметно уменьшить, если заменить металлические детали, находящиеся вблизи подвижной системы прибора, немагнитными. В астатическом амперметре электромагнитной системы типа Э-51 стойки и коробка успокоителя сделаны не из металла; из рис. 2 видно, что погрешности его примерно в 1,5—2 раза меньше, чем у других амперметров электромагнитной системы.

3. Электродинамические амперметры

Амперметры электродинамической системы на токи свыше 0,5 а имеют шунтированную подвижную катушку для ограничения величины проходящего по ней тока. В этом случае явления усложняются, так как при изменении частоты меняется величина тока, проходящего по подвижной катушке, и сдвиг фаз между токами в ней и неподвижной катушке. Так как вращающий момент прибора зависит от произведения токов в катушках и угла сдвига фаз между этими токами, то с частотой изменяются показания прибора. Источником наибольших погрешностей этих схем является э. д. с. взаимной индукции,

наведенной в подвижной катушке магнитным полем неподвижной обмотки. Эта э. д. с. вызывает дополнительный ток в замкнутой цепи подвижной катушки, величина которого и фаза зависят от положения подвижной катушки и от параметров ее цепи.

Из литературных источников известно [2], что частотная погрешность, вызванная взаимной индукцией между катушками прибора

$$\gamma = - \left[\frac{1}{2} \frac{I_1 \omega^2 L_2 M}{I_2 R_2^2} \right],$$

где I_1 — ток в неподвижной катушке;
 I_2 — ток в подвижной катушке;
 R_2 и L_2 — активное сопротивление и индуктивность цепи подвижной катушки.

В соответствии с изменением коэффициента взаимной индукции для разных точек шкалы, амперметры с шунтированной подвижной катушкой имеют возрастающие с увеличением частоты измеряемого тока отрицательные поправки в начале шкалы и положительные в конце ее.

На рис. 4 представлена зависимость поправок электродинамического амперметра типа ЭДА от частоты для нескольких точек шкалы. Характер кривых показывает, что действительно основной причиной частотной погрешности электродинамических амперметров является взаимная индукция между катушками. Влияние вихревых токов для амперметров с шунтированной подвижной катушкой играет второстепенную роль. Дополнительный паразитный момент вихревых токов может быть выражен

$$D = - \frac{\omega^2 M_2 R_n I_1^2}{R_2 (R_n^2 + \omega^2 L_n^2)} (K_n M - K_2 M_n),$$

где M — коэффициент взаимной индукции между катушками.

Теоретические исследования [2] показывают, что погрешность от взаимной индукции устраняется при чисто активном сопротивлении цепи подвижной катушки, что создается специальной схемой частотной компенсации.

Наибольшее распространение получила схема, изображенная на рис. 5, где часть сопротивления, включенного в цепь подвижной катушки, шунтируется емкостью. Однако частотные пределы таких компенсированных схем ограничены, как видно из рис. 5 и 6.

На рис. 5 представлена зависимость погрешности от частоты для электродинамического прибора типа ЭЛА класса 0,2 на 2,5—5 а, который скомпенсирован для частоты 50 гц и потому уже при 1000 гц погрешности его превосходят допустимую для класса 0,2. На рис. 6 дана эта же зависимость для электродинамического прибора класса 0,1 на 2,5—5 а, также предназначенного для 50 гц. Однако, как видно из кривой, прибор может применяться до 2000 гц вследствие лучшего подбора параметров схемы. Для всех исследованных двухпредельных амперметров электродинамической системы частотные характеристики почти совпадают для обоих пределов.

4. Вольтметры

Вольтметры электродинамической и электромагнитной систем могут рассматриваться совместно, так как и у тех и у других основным источником частотной погрешности является возрастание индуктивного сопротивления.

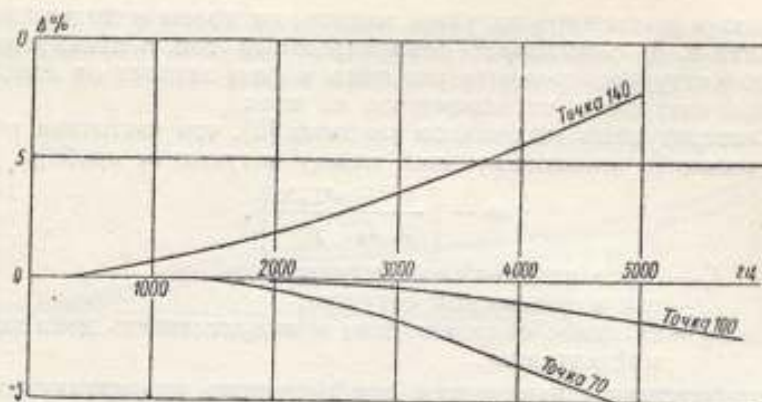


Рис. 4. Зависимость поправок от частоты для прибора типа ЭЛА на 0,75 - 1,5 а.

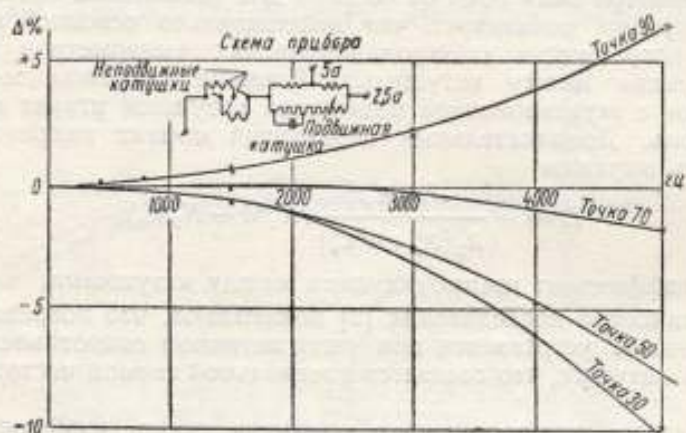


Рис. 5. Зависимость поправок от частоты для амперметра типа ЭЛА на 2,5 - 5 а.

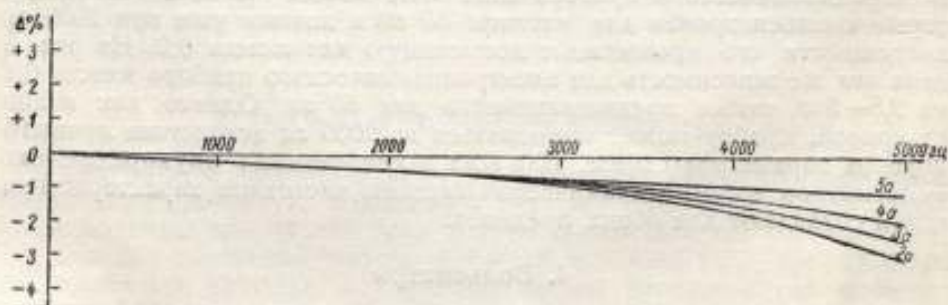


Рис. 6. Зависимость поправок от частоты для электродинамического амперметра фирмы Вестон класса 0,1 на 2,5 - 5 а.

Частотные погрешности некомпенсированных вольтметров. Погрешность вольтметров определяется приблизительно выражением

$$\gamma = -\frac{1}{2} \frac{\omega^2 L^2}{R^2}, \quad (4)$$

где R — общее активное сопротивление прибора;

ωL — общее индуктивное его сопротивление, увеличивающееся с возрастанием угла отклонения.

Относительная погрешность вольтметров, таким образом, увеличивается к концу шкалы. Возрастание общей индуктивности с увеличением отклонения обусловлено в электромагнитных приборах втягиванием сердечника в магнитное поле катушек; в электродинамических — изменением коэффициента взаимной индукции между катушками, потому что общая индуктивность электродинамического вольтметра

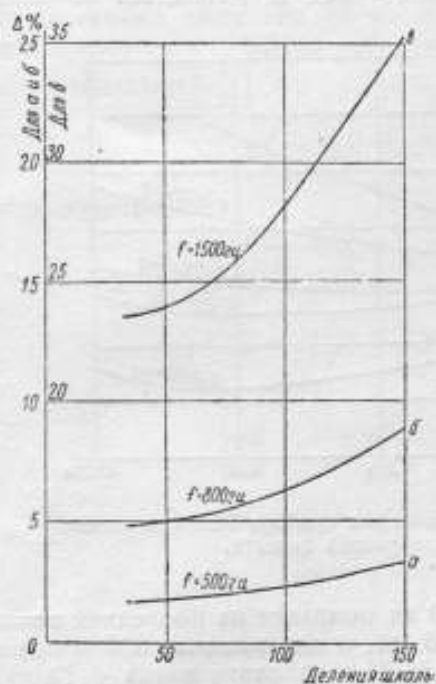


Рис. 7. Изменение поправки по шкале вольтметра типа ЭЛВ для предела измерения 75 в.

в электромагнитных приборах втягиванием сердечника в магнитное поле катушек; в электродинамических — изменением коэффициента взаимной индукции между катушками, потому что общая индуктивность электродинамического вольтметра

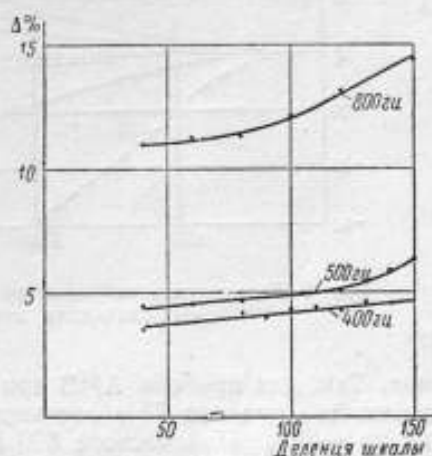


Рис. 8. Изменение поправки по шкале вольтметра типа АМВ для предела измерения 75 в.

при последовательном соединении его катушек складывается из индуктивности этих катушек и взаимной индуктивности между ними.

Соответственно изменению индуктивности прибора для различных точек шкалы изменяется и погрешность. На рис. 7 и 8 представлено изменение поправки по шкале прибора для вольтметров типа ЭЛВ (электродинамической системы, класса 0,2) и вольтметра типа АМВ (электромагнитной системы, класса 0,5). Как видно по кривым, построенным в обоих случаях для предела измерения 75 в, наибольшая погрешность получается на последней точке шкалы, и разница в погрешностях в начале шкалы и в конце ее увеличивается с возрастанием частоты. Вихревые токи вызывают в вольтметрах погрешности значительно меньшие, чем увеличение индуктивного сопротивления, и в этом случае ими можно пренебречь для простоты рассуждения.

В некоторых случаях при неудачной конструкции вольтметра появляются большие погрешности, вызванные емкостными токами в катушках или добавочных сопротивлениях.

Например, в приборах АМВ и АСТВ электромагнитной системы катушка прибора состоит из двух обмоток, наматываемых вместе, между которыми существует заметная распределенная емкость. На малых пределах измерения, когда обмотки соединены параллельно, эта емкость замкнута. На больших пределах при последовательном соединении обмоток емкость шунтирует их, и с увеличением частоты происходит не возрастание общего сопротивления прибора, а уменьшение его. Поэтому в приборах типа АМВ и АСТВ при увеличении предела измерения погрешность меняет знак и возрастает по вели-

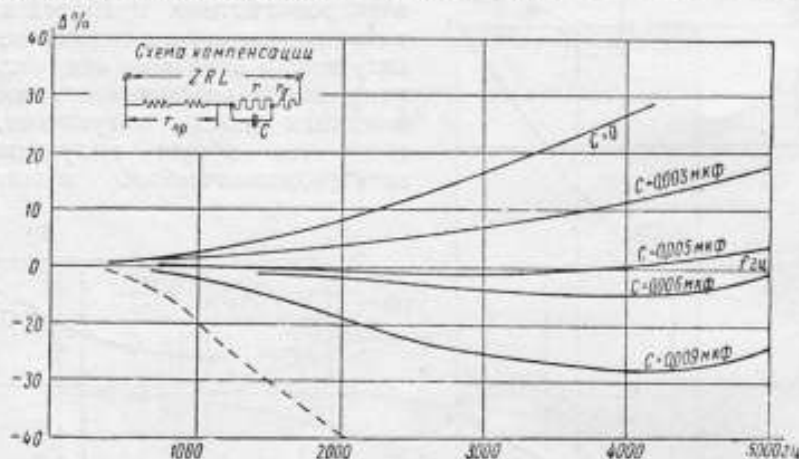


Рис 9. Зависимость поправок от частоты для прибора ЭТИ при различных значениях компенсирующей емкости.

чине. Так, для прибора АМВ при 500 гц поправка на последней точке шкалы для предела 75 в составит +6,4%, а для предела 300 в доходит до -30%. При частоте 800 гц для 75 в поправка равна +14,3%, а для 300 в -44%. Поэтому эти приборы нельзя применять при повышенных частотах без переделки.

В вольтметрах обычной конструкции влиянием емкостных токов можно пренебречь, и так как погрешности их в основном определяются возрастанием индуктивного сопротивления, то при переходе на более высокий предел измерения погрешности обычно уменьшаются, потому что уменьшается отношение $\frac{L}{R}$ в ур-нии (4).

Частотные погрешности компенсированных вольтметров. Частотная погрешность вольтметров может быть скомпенсирована для некоторого диапазона частот. Наиболее часто для этой цели применяется шунтирование части добавочного сопротивления вольтметра емкостью, как указано на рис. 9. Параметры такой схемы выбирались прежде [2] исходя из условия о равенстве нулю реактивной составляющей общего сопротивления вольтметра, что приводило к следующей зависимости:

$$C = \frac{L}{K^2 R^2},$$

где K — отношение части сопротивления шунтированного емкостью C к общему активному сопротивлению прибора R .

Указанное условие безреактивности цепи, т. е. отсутствия сдвига между приложенным напряжением и током, не имеет смысла для вольтметров.

Отклонение вольтметра будет соответствовать величине приложенного напряжения, если сопротивление цепи вольтметра не будет меняться по абсолютной величине, т. е. следует стремиться к тому, чтобы абсолютное значение отношения $\left| \frac{Z}{R} \right| = 1$. Отклонение этого отношения от единицы дает величину частотной погрешности. Исходя из этого очевидного положения, найдем теоретическое выражение для величины поправки на частотную погрешность скомпенсированного вольтметра. Найдем для указанной на рис. 9 схемы компенсации отношение $\left| \frac{Z}{R} \right|$

$$Z = r_a + r_{np} + j\omega L + \frac{r}{1 + j\omega RC}.$$

Если обозначим

$$\frac{r}{R} = K; \quad \frac{L}{R} = \tau \quad \text{и} \quad KRC = \tau_1,$$

то

$$Z = R \left\{ (1 - K) + j\omega\tau + \frac{K}{1 + j\omega\tau_1} \right\}$$

и отсюда

$$\frac{Z}{R} = \frac{(1 - \omega^2\tau\tau_1) + j\omega[\tau + \tau_1(1 - K)]}{1 + j\omega\tau_1}. \quad (5)$$

Так как нас интересует величина поправки

$$\Delta = \left| \frac{Z}{R} \right| - 1, \quad (6)$$

то для удобства сопоставления ур-ний (5) и (6) найдем квадрат отношения $\frac{Z}{R}$. Так как квадрат модуля комплексной величины равен сумме квадратов ее вещественной и мнимой части, то из ур-ния (5) получим

$$\left| \frac{Z}{R} \right|^2 = \frac{(1 - \omega^2\tau\tau_1)^2 + \omega^2[\tau + \tau_1(1 - K)]^2}{1 + \omega^2\tau_1^2}.$$

Преобразуя последнее выражение и обозначая

$$2K - K^2 + 2K\frac{\tau}{\tau_1} = B,$$

получаем

$$\left| \frac{Z}{R} \right|^2 = 1 + \omega^2\tau^2 - B + \frac{B}{1 + \omega^2\tau_1^2}. \quad (7)$$

Из ур-ния (6) получаем

$$\left| \frac{Z}{R} \right|^2 = 1 + 2\Delta + \Delta^2.$$

Пренебрегая величиной Δ^2 по сравнению с единицей, получим

$$\left| \frac{Z}{R} \right|^2 = 1 + 2\Delta$$

и сопоставляя с ур-нием (7)

$$2\Delta = \omega^2\tau^2 - B + \frac{B}{1 + \omega^2\tau_1^2} \quad (8)$$

Полученное уравнение удобно для графического анализа зависимости поправки к показаниям вольтметра от частоты. Если положить $\omega^2 = y$, то ур-ние (8) можно представить состоящим из уравнений прямой

$$\gamma_{11} = B - \tau^2 y$$

и гиперболы

$$\gamma_{12} = \frac{B}{1 + \tau_1^2 y}$$

Разность ординат этих кривых равна удвоенной поправке.

Для примера на рис. 10 представлено графическое построение этого уравнения для вольтметра типа ЭТИ при двух различных величинах шунтирующей емкости и для двух пределов измерения.

Рассматривая величину и знак отрезка ординаты, заключенного между

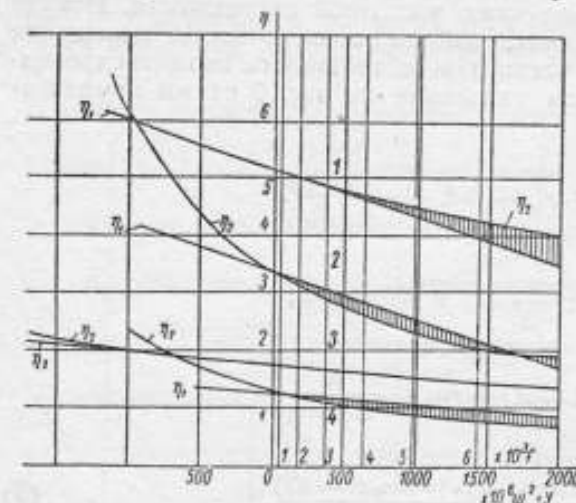


Рис. 10. Графический метод теоретического определения частотной погрешности прибора при компенсации емкостью для прибора ЭТИ:

- 1— $L=0,1$ гн; $K=0,88$; $r=3000$ ом; $C=4000$ пф;
 2— $L=0,1$ гн; $K=0,88$; $r=3000$ ом; $C=7000$ пф;
 3— $L=0,1$ гн; $K=0,44$; $r=3000$ ом; $C=4000$ пф;
 4— $L=0,1$ гн; $K=0,44$; $r=3000$ ом; $C=7000$ пф.

дуги гиперболой и прямой, являющегося мерилем погрешности, увидим, что при компенсации вольтметра возможны следующие соотношения:

1. Гипербола проходит выше прямой, поэтому поправка положительна при любых частотах. Это означает, что емкость недостаточно велика и прибор недокомпенсирован.

2. Гипербола и прямая имеют вторую точку пересечения, до которой гипербола идет ниже прямой и, следовательно, поправка отрицательна. После точки пересечения она становится положительной. В этом случае емкость велика и прибор перекомпенсирован.

В обоих случаях прямые $\gamma_{11} = B - \tau^2 y$ параллельны между собой, так как для данного предела измерения угловой коэффициент прямой $\tau^2 = \frac{L^2}{R^2}$ не меняется. Для случая 3 и 4, т. е. при увеличении предела измерения вольтметра, угловой коэффициент изменится, и прямая будет более пологой.

3. Прямая и гипербола почти совпадают в широком диапазоне частот. Соотношение между емкостью и параметрами прибора обеспечивает компенсацию частотной погрешности.

4. Гипербола идет ниже прямой, и поправки получаются отрицательными, т. е. так же как для случая 2 имеем перекомпенсацию. При

некоторой частоте произойдет пересечение гиперболы и прямой, так как гипербола асимптотически приближается к оси, а прямая пересекает ее в определенной точке. После точки пересечения поправки вновь станут положительными.

На рис. 9 приведены полученные опытным путем частотные характеристики для этого вольтметра, подтверждающие справедливость приведенных теоретических рассуждений и построений.

Определение оптимального условия компенсации индуктивности вольтметров. Наименьшие частотные погрешности получаются при совпадении гиперболы и прямой для определенного диапазона частот. Пользуясь методом наименьших квадратов, можно найти условие, при котором с наибольшей степенью приближения уравнение гиперболы может быть заменено выражением первой степени в промежутке от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_1$.

В этом случае [3] сумма квадратов отклонений при различных значениях $y = \omega^2$ в интересующем нас промежутке от 0 до y_1 должна иметь наименьшее значение, т. е.

$$S = \int_0^{y_1} \left[\frac{B}{1 + \tau_1^2 y} - (my + n) \right]^2 dy \quad (9)$$

должен иметь минимум. Для этого производные интеграла по параметрам, которыми являются коэффициенты искомой прямой, должны равняться нулю, т. е.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial m} = \int_0^{y_1} \left(\frac{B}{1 + \tau_1^2 y} - my - n \right) y dy = 0;$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial n} = \int_0^{y_1} \left(\frac{B}{1 + \tau_1^2 y} - my - n \right) dy = 0.$$

Интегрируя эти уравнения и подставляя пределы, получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{\tau_1^2} y_1 - \frac{B}{\tau_1^2} \ln(1 + \tau_1^2 y_1) - \frac{m y_1^3}{3} - \frac{n y_1^2}{2} &= 0; \\ \frac{B}{\tau_1^2} \ln(1 + \tau_1^2 y_1) - \frac{m y_1^2}{2} - n y_1 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Эти уравнения дают условия для определения параметров прямой, совпадающей в некотором интервале частот (т. е. значений y) с гиперболой, определяемой уравнением $\frac{B}{1 + \tau_1^2 y}$. Если поставить дополнительное условие, чтобы угловой коэффициент этой прямой

$$m = -\tau^2$$

и свободный член ее

$$n = B$$

и если считать, что $\tau = \frac{L}{R}$ задается конструкцией прибора, можно определить, при каком B и τ_1 , т. е. при какой емкости C , будут удов-

летворяться уравнения (10). Для этого подставим выражение для m и n в уравнения (10) и решив их совместно, получаем

$$\frac{\tau^2 y_1^2}{2\tau_1^2} + \frac{\tau^2 y_1^3}{3} - \frac{By_1^2}{2} = 0,$$

откуда

$$B = \frac{2}{3} \tau^2 y_1 + \frac{\tau^2}{\tau_1^2}.$$

И, следовательно (подставляя значения B)

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \frac{L}{KR^2C} = K + \sqrt{2K - \frac{2}{3} \tau^2 y_1},$$

а искомая величина емкости

$$C = \frac{\frac{L}{KR^2}}{K + \sqrt{2K - \frac{2}{3} \frac{L^2}{R^2} \omega_1^2}}. \quad (11)$$

Из этого уравнения видно, что величина емкости зависит от частоты, до которой желательно осуществлять компенсацию. Чем больше эта частота, тем больше получается расхождение между гиперболой и прямой, т. е. частотные погрешности в этом интервале.

Для сравнительно невысоких частот, при которых справедливо условие

$$\tau^2 \omega^2 \ll 3K,$$

уравнение для выбора C можно упростить

$$C = \frac{L}{R^2(K^2 + K\sqrt{2K})}. \quad (12)$$

Следует помнить, что в уравнениях (11) и (12) величина L есть переменная, меняющаяся в некоторых пределах в зависимости от отклонения стрелки прибора, минимальная в начале шкалы и максимальная в конце ее.

Таким образом возможности, которые дает схема частотной компенсации, обычно ограничиваются тем, что в начале и конце шкалы появляются погрешности различного знака. Изменение же компенсирующей емкости с изменением отклонения осуществить довольно трудно, хотя возможно (выполнение успокоителя в виде конденсатора переменной емкости со сравнительно малым C).

Практические данные о схемах компенсации вольтметров. Накопленный опыт и возможность точной проверки вольтметров на повышенной частоте термоэлектрическим методом позволили подобрать наиболее удачные параметры схемы компенсации частотной погрешности вольтметров, выпускаемых промышленностью для 50 гц, и тем значительно расширить их частотный диапазон.

Приборы, имеющие схему частотной компенсации, могут быть использованы для точных измерений при повышенной частоте и в качестве образцовых для проверки сличением приборов низкого класса точности.

Для схем компенсации рекомендуется применять конденсаторы типа КСО и КСГ. Нестабильность их по техническим условиям не превосходит 0,5%, а температурный коэффициент не более $\pm 2 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 1

Примеры компенсации частотной погрешности приборов

Данные приборов, изготовленные промышленностью	Рекомендуемая схема компенсации		Наибольшая погрешность в диапазоне частот для компенсации С компенсации
	Стена	Дополнительная система компенсации	
ЗЛВ эВ 75-150-300 В к.л. Q2			±0.3 % -4.5 % 0-500 Гц
ЗГ 634321 эВ (Герм.) 15-30-75 В к.л. Q2			-0.3 % 0-500 Гц
Вестон эВ 75-150-300 В к.л. Q3			±0.1 % 0-400 Гц
АСТВ э.м. 150-300 В к.л. Q5			±0.5 % 0-400 Гц -3% для пределов 150 В +6% для пределов 300 В
ЭТН эВ 150-260 В к.л. Q5			±0.5 % 0-1000 Гц
Э-51 эВ 5А 1000 Гц к.л. Q9			±0.5 % 0-1000 Гц

Если в выражении (8) выразить величины B , τ и τ_1 через параметры прибора, то получаем уравнение для частотной погрешности скомпенсированного вольтметра в следующем виде

$$2\Delta = \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2 - 2\frac{r}{R} - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 2\frac{L}{R^2 C} + \frac{2\frac{r}{R} - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 2\frac{L}{R^2 C}}{1 + \omega^2 r^2 C^2}$$

Анализируя это выражение, видим, что небольшие изменения компенсирующей емкости, вызванные нестабильностью или изменением температуры, почти не влияют на погрешность прибора.

В табл. 1 собраны данные о схемах компенсации некоторых приборов.

Вольтметр типа ЭЛВ класса 0,2 на 50 $\mu\text{в}$ имеет схему частотной компенсации, осуществляемую при изготовлении и указанную во втором столбце табл. 1. При этом, как видно из рис. 7, погрешность его при частоте 500 $\mu\text{в}$ превышает 4%. При изменении схемы компенсации, как это указано в табл. 1, погрешность прибора во всем диапазоне от 50 до 500 $\mu\text{в}$ на всех пределах измерения не превосходит 0,3% и в случае необходимости более точных измерений может быть учтена.

При компенсации прибора по схеме, указанной в третьем столбце табл. 1, изменяются параметры и схема включения конденсаторов и, кроме того, используется один дополнительный контакт на переключателе пределов измерения для включения емкости 0,01 $\mu\text{кф}$ на пределе 150 в . Если это

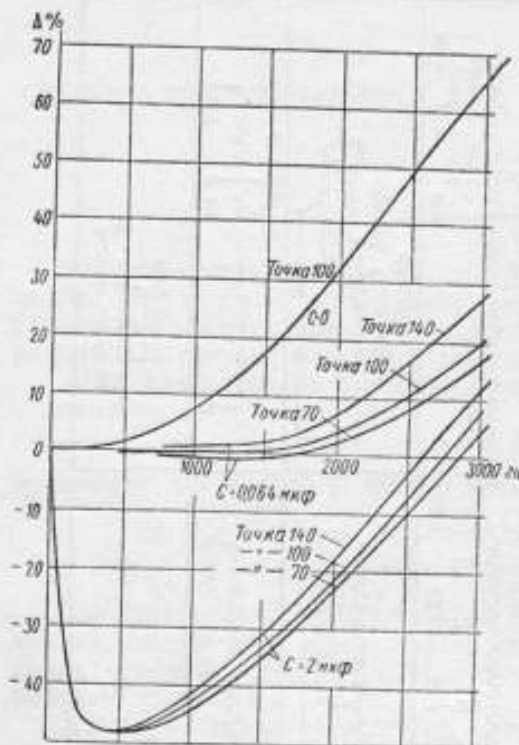


Рис. 11. Зависимость поправок от частоты для вольтметра фирмы Вестон класса 0,1 при различной компенсирующей емкости для предела измерения 150 в .

представляет трудности, то схему можно смонтировать так, чтобы для каждого предела включались отдельные конденсаторы.

Чтобы использовать приборы АМВ и АСТВ на всех пределах, обмотки их следует всегда соединять параллельно. Катушки, составляющие добавочное сопротивление для 300 в , также включаются в две параллельные цепи и компенсация производится, как это показано в табл. 1.

Из таблицы видно, что вольтметры обычной конструкции, имеющие схему частотной компенсации, могут применяться в сравнительно узком диапазоне частот. Использование скомпенсированного вольтметра при какой-либо фиксированной повышенной частоте, выходящей из этого диапазона, не дает удовлетворительных результатов по следующим причинам.

1. Изменение индуктивности при повороте подвижной системы прибора приводит к тому, что при больших частотах получается значительная разница в погрешностях на различных точках шкалы. Это иллюстрируется кривыми рис. 11, где приведены изменения поправок вольтметра класса 0,1 для трех точек шкалы при компенсации его значительной емкостью.

2. Сравнительно небольшое изменение частоты приводит к значительному изменению погрешности прибора, что видно из характера кривой частотной погрешности для этого случая.

3. Ввиду резкого возрастания крутизны частотной характеристики прибора, даже небольшой процент высших гармоник в кривой измеряемого напряжения приводит к значительному изменению погрешности прибора.

Очевидно, что дальнейшее расширение области применения электродинамических и электромагнитных вольтметров на повышенных частотах возможно лишь при уменьшении их индуктивности.

Заключение

Приборы электродинамической и электромагнитной системы, как известно, обладают наименьшими основными погрешностями, что является основанием для применения их в качестве образцовых также и при повышенных частотах.

Целесообразность применения приборов электродинамической и электромагнитной системы для точных измерений при повышенных частотах подтверждается приводимыми в настоящей статье теоретическими и опытными материалами.

Выпускаемые нашей промышленностью приборы этих систем, предназначенные для повышенных частот, пока ограничены по точности и диапазону частот.

При небольших изменениях конструкции могут быть созданы амперметры для измерения во всем диапазоне частот от 0 до 10 000 гц с погрешностью 0,5—1,0%.

Частотный диапазон вольтметров зависит в сильной степени от предела измерения. Вольтметры на 150—300 в могут иметь погрешности, не превышающие 0,5—1,0% в диапазоне частот 0—2000 гц.

Проведение настоящей работы позволило наметить пути дальнейшего улучшения частотных характеристик с целью создания образцовых приборов для повышенной частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каяндер М. С., Термоэлектрический метод проверки амперметров и вольтметров на переменном токе нормальной и повышенной частоты, „Вестник электропромышленности“, 1952, № 1.
2. „Расчет и конструирование электроизмерительных приборов“. Под ред. Н. Н. Пономарева, Ленинград, 1943.
3. Безикович Я. С., Приближенные вычисления, Гостехиздат, 6-е издание, 1949.

КОМПЛЕКТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЕРКИ АМПЕРМЕТРОВ И ВОЛЬТМЕТРОВ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Выбор метода измерения

Современная электротехника характеризуется энергетическим применением переменных токов, частота которых выше стандартной частоты распределительных сетей. Находят применение токи, частоты которых лежат в пределах от 200 до 10 000 гц. Производство и эксплуатация оборудования, предназначенного для повышенных частот, вызывает потребность в электронизмерительных приборах различного рода, в первую очередь в приборах для измерения силы тока и напряжения. Градуировка этих приборов при изготовлении и периодическая поверка в процессе эксплуатации должны производиться с достаточной достоверностью. Поэтому необходимо наличие достаточного количества более точных приборов (класса 0,2 и 0,5), при контроле которых требуется еще более высокая точность измерений. Так, при поверке приборов класса 0,2 погрешности не должны превосходить 0,05 + 0,06%, а для приборов класса 0,5 0,1 + 0,15%.

Прежде, когда в области энергетики применялась почти исключительно частота 50 гц, основная масса приборов переменного тока поверялась сличением с электродинамическими приборами, которые в свою очередь поверялись на компенсационных установках постоянного тока. Таким образом, перенос единиц измерения предполагал неизменность показаний электродинамических приборов на постоянном и переменном токе.

По мере повышения требуемой точности измерений было создано несколько конструкций уникальных электродинамических приборов, служащих в качестве исходных для поверки ванбоолее точных приборов переменного тока [1]. Однако показания этих приборов остаются неизменными лишь при низкой частоте (50 + 60 гц), при повышенной же частоте требуется детальное изучение дополнительных погрешностей и введение поправок. Но и в этом случае область применения их не превышает 2000 гц. Изучением свойств переносных электродинамических и электромагнитных приборов при повышенной частоте тока занималась канд. техн. наук М. С. Каяндер. В ее работе¹ можно найти более подробные сведения по этому вопросу.

Для точных измерений напряжения, мощности и силы тока при поверке приборов переменного тока применялись также специально сконструированные квадрантные электрометры [2]. Они имеют некото-

¹ См. статью М. С. Каяндер, помещенную в настоящем сборнике.

рые существенные преимущества перед электродинамическими приборами: можно легко изменять пределы измерений одного и того же прибора не только по напряжению, но и по току; потребление мощности самим прибором очень мало; отсутствует погрешность от вихревых токов, изменений частоты и формы кривой. Поэтому для некоторых целей, особенно для измерений мощности, может быть использован электростатический принцип. Для измерений же только силы тока и напряжения он не является лучшим.

Распространено мнение, что одним из лучших приборов для рассматриваемой цели является компенсатор переменного тока. Однако опыт Лаборатории электрических измерений ВНИИМ по применению полярно-координатного компенсатора для поверки приборов при частотах $400 \div 500$ гц, освещенный в статье А. Я. Безикович [3], приводит к другому заключению. Отметим некоторые недостатки этого прибора: а) длительность процесса измерения, вызываемая необходимостью регулировать поочередно модуль и фазу компенсирующего напряжения; б) сложность устранения влияния емкостных токов, возникающих в цепи указателя равновесия и в других частях схемы; в) погрешность от искажения формы кривой тока, могущая даже при относительно благоприятных условиях достигать до $0,1 \div 0,15\%$. В связи с этим компенсатор переменного тока неудобен для поверки амперметров и вольтметров, особенно при повышенной частоте тока.

Для измерения переменных токов могут быть применены и методы, основанные на преобразовании переменного тока в постоянный. Однако это преобразование с применением выпрямителей приходится сразу же отвергнуть, так как с его помощью можно измерять, как правило, либо среднее, либо амплитудное значение выпрямленного тока, между тем большинство поверяемых приборов градуировано в действующих значениях, и применение выпрямителей внесло бы очень большую зависимость от формы кривой измеряемого тока, которую принципиально нельзя устранить.

Термоэлектрический прибор, как сочетание термопреобразователя с магнетозлектрическим прибором, не является точным прибором, так как показания его неустойчивы вследствие непостоянства свойств термопреобразователя во времени и зависимости от колебаний температуры. Однако термопреобразователь правильно передает действующее значение переменного тока в широком диапазоне частот, и если контролировать свойства его достаточно часто, например, при каждом измерении, то он может быть использован для точных измерений.

Давно уже известны устройства для воспроизведения заданного значения переменного тока, сравниваемого с эквивалентным ему значением постоянного тока с помощью двух идентичных термопреобразователей, термопары которых включены через гальванометр навстречу друг другу [4]. Недостатком этих устройств, по нашему мнению, является наличие не одного, а двух термопреобразователей, свойства которых не всегда одинаковы и изменяются различным образом. Проще и надежнее применять только один термопреобразователь, попеременно включаемый в цепь переменного и постоянного тока. Значение постоянного тока, воспроизводящее термоэлектродвижущую силу, зафиксированную на переменном токе, может приниматься при определенных условиях за искомое значение переменного тока.

Этот метод с применением вакуумного термопреобразователя для измерения напряжения и воздушных термопреобразователей для измерения силы тока впервые во ВНИИМ был осуществлен М. С. Каяндер

и использован ею для уже упомянутого изучения свойств электродинамических и электромагнитных приборов. Эта же схема применена и в новой аппаратуре, разработанной в американском Бюро стандартов, для точных измерений переменных токов и напряжений [6].

Оценка теплового действия измеряемого тока может производиться и иным образом. Можно применить фотоэлементы, термосопротивления или использовать эмиссию электронов в вакууме. Опыты с фотоэлементами, поставленные автором этой статьи, показали, что современные типы фотоэлементов с запирающим слоем дают быстро спадающую электродвижущую силу. Вследствие этого после каждого перехода светового потока, падающего на фотоэлемент, к новому значению характер дальнейшего изменения э. д. с. зависит от предыдущего режима, и она не является однозначной функцией светового потока. Поэтому точность методов, основанных на применении фотоэлементов [6, 7], уступает термоэлектрическому методу.

Описание мостовой схемы с двумя термосопротивлениями, по нагревателям которых проходят сравниваемые переменный и постоянный токи, опубликовано в работе Шрадера [8]. Однако, принимая во внимание весьма значительную неустойчивость полупроводниковых сопротивлений, этой схеме также нельзя отдать предпочтение перед схемой с термопреобразователями.

В 1934 г. в Лаборатории электрических измерений ВНИИМ была выполнена работа по использованию явления эмиссии электронов накаленной вольфрамовой нитью электронной лампы с целью точного сравнения теплового действия переменного и постоянного тока [9]. Эта работа была также принята во внимание автором настоящей статьи. Однако, так как ток накала электронной лампы можно изменять лишь в очень ограниченных пределах, то она не совсем удобна при решении задачи измерения токов в широком диапазоне значений.

Таким образом, сравнение ряда известных принципов измерения переменных токов и напряжений приводит к выводу, что лучшим в настоящее время можно считать метод с применением термопреобразователя. Он позволяет измерять напряжения от 0,1 до сотен вольт и токи в широком диапазоне значений от одного миллиампера до десятков и сотен ампер. Этот метод (в дальнейшем мы будем называть его термоэлектрическим методом) и был положен в основу разработанной под руководством автора аппаратуры для проверки амперметров и вольтметров переменного тока при частоте от 50 до 20 000 гц.

2. Принципиальные схемы термоэлектрического метода

Как уже было указано, термоэлектрический метод измерения токов и напряжений повышенной частоты основан на сравнении измеряемой величины переменного тока с одноименной величиной постоянного тока при помощи термопреобразователя.¹ Токи, пропускаемые по нагревателю термоэлемента, принимаются равными, если они вызывают равные термоэлектродвижущие силы (т. э. д. с.). Практически сначала включают в цепь нагревателя термоэлемента измеряемую величину переменного тока и замечают вызываемую ею т. э. д. с., а затем включают в ту же цепь одноименную величину постоянного тока и регулируют ее так, чтобы т. э. д. с. приняла прежнее значе-

¹ Поскольку в описываемой ниже аппаратуре применяются только простейшие термопреобразователи с одной термопарой, часто называемые термоэлементами, мы будем применять этот последний термин как более короткий.

ние. Требуемое для этого значение постоянного тока или напряжения и принимается за действительное значение измеряемой величины.

В зависимости от вида измеряемой величины и типа термоэлемента могут применяться принципиальные схемы, показанные на рис. 1. Схема, приведенная на рис. 1, а, применяется при измерении напряжения. Последовательно с вакуумным термоэлементом ТЭ включен магазин сопротивлений МС с возможно малой реактивностью. Значение сопротивления подбирается в соответствии с измеряемым напряжением, чтобы получить подходящую силу тока в термоэлементе.

Измерение силы тока может производиться двумя способами. В схеме рис. 1, б применен воздушный термоэлемент, рассчитанный на весь измеряемый ток. В схеме рис. 1, в вместо воздушного применен вакуумный термоэлемент ТЭ на малую силу тока с включенным параллельно шунтом Ш.

Во всех схемах для повышения точности т. э. д. с. измеряется не прибором непосредственной оценки, а компенсатором. При этом

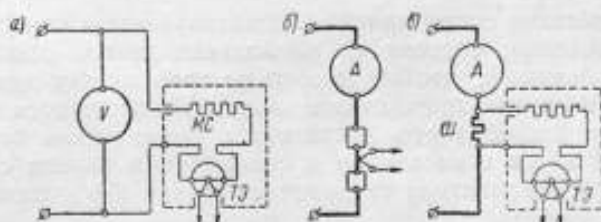


Рис. 1. Принципиальные схемы измерения напряжения и силы тока термоэлектрическим методом.

требуется не определение ее абсолютного значения, а лишь точное воспроизведение прежнего значения после включения постоянного тока. Вместо нормального пятидесятилетнего компенсатора для воспроизведения т. э. д. с. может применяться упрощенный компенсатор, состоящий из одиночной катушки, магазина сопротивления и миллиамперметра, шкалу которого можно проградуировать непосредственно в значениях падения напряжения на катушке. Последнее (т. е. падение напряжения) и используется для компенсации т. э. д. с.

При высоких требованиях к точности измерений (например при поверке приборов класса 0,2 и 0,5) величина, воспроизводимая на постоянном токе, может измеряться компенсатором, а при поверке приборов низших классов точности — стрелочным магнитоэлектрическим прибором, т. е. выбор образцовых приборов для измерения постоянного тока производится так же, как и при обычных поверках на постоянном токе.

3. Теоретическая оценка погрешностей

Большим преимуществом указанных схем является то, что в результате измерений не входят значения сопротивлений, совместно с которыми включен термоэлемент. Это, конечно, не значит, что погрешности вообще отсутствуют. Погрешности электрического характера, которые могут возникнуть в схемах, приведенных на рис. 1, имеют ту общую причину, что явления на переменном токе происходят более сложным образом, чем на постоянном. В цепи термоэлемента имеются индуктивности, ее отдельные участки шунтируются емкостями; цепь эта может быть связана индуктивным и емкостным путем с дру-

гми цепями, да и активное сопротивление цепи не остается постоянным при изменении частоты. Кроме того, погрешности могут также возникнуть из-за несовершенства свойств термоэлементов и неустойчивости самой измеряемой величины.

Рассмотрим схемы рис. 1 с точки зрения возникающих в них систематических погрешностей электрического характера.

В схеме измерения напряжения (рис. 1, а) наблюдаются в основном два вида погрешностей: погрешность из-за реактивности добавочного сопротивления и погрешность от шунтирующих емкостных токов.

Погрешность из-за реактивности добавочного сопротивления определяется формулой

$$\frac{\Delta U}{U} = -\frac{1}{2} \omega^2 \tau_s^2, \quad (1)$$

где ω — угловая частота;

$\tau_s = \frac{L}{r} - Cr$ — постоянная времени добавочного сопротивления.

Обычно магазин сопротивления, используемый в качестве добавочного сопротивления, состоит из нескольких декад. Магазин должен быть экранированным, чтобы емкостные токи между декадами магазина и окружающими предметами можно было отвести мимо термоэлемента. Это проще всего достигается помещением термоэлемента в один общий экран с магазином и соединением экрана с выходящим наружу концом нагревателя термоэлемента, как это показано на схеме рис. 1, а.

Рассмотрим действие емкостных токов между декадами магазина и экраном. Для простоты предположим, что магазин состоит только из двух декад и емкость между декадами и экраном имеет сосредоточенный характер и присоединена к междекадному соединению (рис. 2). Сопротивление этой цепи, рассматриваемое как отношение приложенного напряжения U к току I_T в термоэлементе, равно

$$Z_{\text{ээк}} = \frac{U}{I_T} = r_1 + r_2 + j\omega C_3 r_1 r_2, \quad (2)$$

т. е. наличие емкости на экран вызывает увеличение $Z_{\text{ээк}}$ и способствует отставанию по фазе тока в термоэлементе от напряжения. Этим можно воспользоваться для компенсации действия емкостей, шунтирующих сопротивления декад магазина, которые уменьшают $Z_{\text{ээк}}$ и создают сдвиг фазы тока в термоэлементе в сторону опережения.

Расчеты и опытные данные показывают, что путем уменьшения реактивности декад магазина и подбора величины емкости на экран возможно сделать результирующую постоянную времени добавочного сопротивления настолько малой, что при частоте в пределах до 20 000 гц погрешность схемы измерения напряжения может быть сделана не превышающей 0,01 ÷ 0,02% для всех значений напряжения до 300 в.

Говоря о емкостных явлениях, следует учесть возможность появления емкостных токов на землю. Между контуром термопары и упрощенного компенсатора, с одной стороны, и землей — с другой стороны, имеется емкость C_2 (рис. 3), которая, будучи включена последовательно с сопротивлением изоляции r и емкостью C_1 между нагревателем и термопарой, образует цепь тока на землю, если между нагревателем и землей имеется напряжение переменного тока (например, благодаря наличию емкости, изображенной пунктиром). Этот ток, проходя по

части нагревателя, вызовет погрешность. Ее можно устранить, заземлив провод цепи переменного тока, соединяемый непосредственно с нагревателем. Это возможно только при питании схемы через изолирующий трансформатор. Соединять с землей цепь постоянного тока не следует, так как получение напряжения постоянного тока от стационарной батареи, имеющей недостаточно хорошую изоляцию, может привести к недопустимо большому току утечки.

Если по каким-либо соображениям заземлять цепь переменного тока нежелательно (например, из-за недостаточно высокой изоляции какого-либо другого ее участка), то можно включить конденсатор большой емкости между концом нагревателя, соединенным с экраном магазина, и термопарой. Он будет шунтировать сопротивление изоляции между термопарой и нагревателем и отвлекать на себя

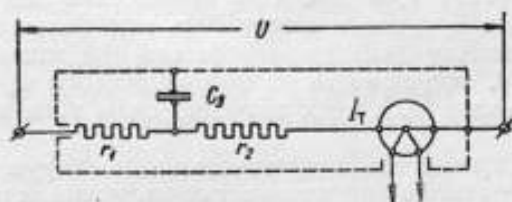


Рис. 2. Схема действия междекадной емкости на экран при измерении напряжения.

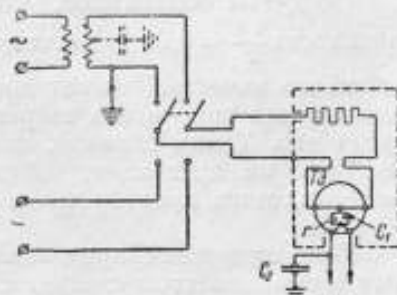


Рис. 3. Действие емкостных токов на землю.

емкостный ток, проходящий в землю через схему упрощенного компенсатора.

Если сопротивление изоляции между нагревателем и термопарой составляет не менее 10 мгом, то, как показывают подсчеты, достаточно взять конденсатор емкостью 0,5 мкф для того, чтобы сделать погрешность при наименьшей частоте диапазона (50 гц) не превосходящей 0,03%, даже в том случае, когда паразитный емкостный ток на землю равен полезному току в нагревателе термоэлемента. Так как такой случай маловероятен, практически погрешность всегда будет значительно меньше.

При измерении больших токов нешунтированным термоэлементом (рис. 1, б) можно опасаться появления погрешности от поверхностного эффекта в нагревателе термоэлемента. Поскольку равные т. э. д. с. при переменном и постоянном токе будут развиваться при равных мощностях в нагревателе, можно найти, что относительная погрешность

$$\frac{\Delta I}{I} = 1 - \sqrt{\frac{r}{r'}}, \quad (3)$$

где r — сопротивление нагревателя при постоянном токе и r' — при переменном.

Принимая для учета поверхностного эффекта простейшую формулу, можно написать

$$\frac{r}{r'} = 1 - \frac{x^4}{3}, \quad (4)$$

где

$$x = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{4\pi^2 f \mu}{\rho}}$$

В этом выражении

d — диаметр нагревателя;

f — частота переменного тока;

μ — магнитная проницаемость;

ρ — удельное сопротивление материала нагревателя.

(Все величины выражены в системе единиц МКС при нерационализированной форме уравнений).

Отсюда для погрешности от поверхностного эффекта легко получить выражение

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{d^4}{96} \left(\frac{\pi^2 f \mu}{\rho} \right)^2 \quad (5)$$

Подсчеты показывают, что для частоты 20 000 гц и значения погрешности $\frac{\Delta I}{I} = 0,01\%$ диаметр нагревателя, выполненного из нихрома хорошего качества, может достигать 1,24 мм. При применении ленточного или трубчатого нагревателя сечение может быть еще больше увеличено. Таким образом, поскольку диаметр нагревателя при токах до 10 а не превышает 0,8 мм, погрешность от поверхностного эффекта остается пренебрежимо малой для всех значений силы тока и частоты.

При измерении предельно малых токов чувствительным вакуумным термозлементом следует считаться с индуктивностью нагревателя и шунтирующей его емкости. Активное сопротивление цепи в этом случае определяется, как известно, выражением

$$r' = r(1 + 2\omega^2 LC - \omega^2 C^2 r^2),$$

а следовательно, погрешность, вычисленная по ф-ле (3),

$$\frac{\Delta I}{I} = \omega^2 LC - \frac{1}{2} (\omega r C)^2 \quad (6)$$

Если индуктивность нагревателя очень мала, то первым членом по сравнению со вторым можно пренебречь. Для заданных значений частоты и сопротивления нетрудно вычислить значение емкости, при котором погрешность достигает 0,01%. При частоте, равной 20 000 гц, и сопротивлении нагревателя 180 ом шунтирующая емкость, вызывающая такую погрешность, равна приблизительно 600 пф. Так как практически очень легко сделать емкость, шунтирующую нагреватель, во много раз меньшей, то с этой погрешностью можно не считаться.

В схеме измерения тока шунтированным термозлементом (рис. 1, в) может возникнуть погрешность из-за реактивности цепей шунта и термозлемента. Формула для этой погрешности может быть приведена к такому виду¹

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{1}{2} \omega^2 \frac{m-1}{m^2} [(m-1)\tau_r^2 + 2\tau_m \tau_r - (m+1)\tau_m^2], \quad (7)$$

¹ Эта формула после подстановки значения $m = \frac{R_m + R_T}{R_T}$ приводится к виду, полученному в 1950 г. Т. Б. Рождественской:

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{1}{2} \omega^2 \left[\left(\frac{R_m \tau_m + R_T \tau_r}{R_m + R_T} \right)^2 - \tau_m^2 \right].$$

где τ_v — постоянная времени цепи термозлемента;
 τ_m — постоянная времени цепи шунта;
 $m = \frac{I_x}{I_r}$ — коэффициент шунтирования.

Принимая во внимание, что шунты на малые токи, сравнимые с током термозлемента, имеют сопротивление порядка десятков Ω и могут быть без затруднений сделаны с исчезающе малой постоянной времени, областью практического применения ф-лы (7) является случай, когда m значительно больше десяти. Тогда

$$\frac{\Delta I}{I} \cong -\frac{1}{2} \omega^2 (\tau_v^2 - \tau_m^2), \quad (8)$$

т. е. с точки зрения уменьшения погрешности из-за реактивности шунта и термозлемента при $m > 10$ существенна малая величина не самих значений постоянной времени цепей, а лишь разности их квадратов. Достаточно, чтобы значения постоянной времени цепей были близки друг к другу по абсолютной величине; алгебраические знаки их могут быть различны, т. е. одна из цепей может иметь емкостный характер, а другая — индуктивный.

При неравных значениях постоянной времени наилучшим будет случай, когда меньшее значение постоянной времени будет равно нулю. Приняв такой случай, можно найти предельное значение другой постоянной времени, при котором повышение частоты до 20 000 гц вызовет погрешность, например, в 0,01%. Нетрудно подсчитать, что постоянная времени не должна превышать $1,1 \cdot 10^{-7}$ сек., чего легко достигнуть во всяком случае для шунтов на силу тока до 10 а.

Наконец, причиной погрешности, особенно при измерении тока шунтированным термозлементом, может послужить явление взаимной индукции. В контуре термозлемента могут возникать дополнительные токи, обусловленные магнитной связью с другими частями контура или наличием внешнего магнитного поля переменного тока. Возможны случаи, когда индуктирующее поле действует только при включении постоянного тока, только при включении переменного или при обоих родах тока. Кроме того, оно может иметь частоту, одинаковую с измеряемым переменным током или отличную от нее. При одинаковой частоте поля и тока могут быть различные сдвиги фаз между ними.

Не останавливаясь на подробном выводе, приведем лишь таблицу окончательных выражений погрешностей для всех этих случаев (табл. 1). В таблице через $I_{инд}$ обозначен индуктированный ток, через I_x — измеряемый ток.

Как видно из таблицы, наиболее неблагоприятными являются случаи Ia и Ib, наиболее благоприятными — случаи IIв и IIIв, когда индуктированный ток действует одинаково и при переменном и при постоянном токе, причем вносимые им погрешности компенсируются. В случаях Ia и Ib погрешность может быть исключена повторным измерением при перемене фазы измеряемого тока на обратную. Если индуктированный ток при этом фазы не меняет, то среднее арифметическое будет свободно от погрешности. В других случаях погрешность переключением фазы не исключается, поэтому следует принимать меры к уменьшению индуктированных токов. Это может быть достигнуто путем уменьшения площади контура термозлемента и внешнего поля, создаваемого шинами, подводными ток, а также

устранением причин появления переменных магнитных полей вблизи контура термозлемента.

Рассмотренные выше погрешности электрического характера при измерениях в одинаковых условиях будут систематически повторяться. Кроме них, однако, можно ожидать возникновения случайных погрешностей, обусловленных неустойчивостью свойств термозлементов. Наибольшей неустойчивостью обладают воздушные термозлементы на большие токи; это объясняется значительной тепловой инерцией и постепенным прогреванием колодок и воздуха, окружающего нагреватель.

Таблица 1

Характер индукции тока	Относительная погрешность измерения тока		
	Одинаковая частота		Различные частоты
	$\varphi = 0$	$\varphi = \frac{\pi}{2}$	
	I	II	III
Мешающий ток индуктируется			
а) только при включении переменного тока	$\frac{I_{инд}}{I_x}$	$\leftarrow \frac{1}{2} \left(\frac{I_{инд}}{I_x} \right)^2 \rightarrow$	
б) только при включении постоянного тока		$\leftarrow \frac{1}{2} \left(\frac{I_{инд}}{I_x} \right)^2 \rightarrow$	
в) при обоих родах тока	$\frac{I_{инд}}{I_x}$	$\leftarrow 0 \rightarrow$	

Существенное влияние на т. э. д. с., особенно в случае вакуумных термозлементов, которые имеют более развитую поверхность нагревателя, оказывает окружающая температура. Это объясняется тем, что часть тепла теряется через лучеиспускание, причем по закону Стефана—Больцмана это тепло пропорционально разности четвертых степеней абсолютной температуры нагревателя и окружающей среды. Повышение температуры среды и нагревателя вызывает увеличение доли тепла, теряемого через излучение, а следовательно, уменьшение разности температур между нагревателем и средой, т. е. понижение т. э. д. с. Для уменьшения и, главное, замедления колебаний температуры вакуумный термозлемент целесообразно помещать в масляную ванну. В этом его большое преимущество перед воздушным термозлементом, который негерметичен и поэтому не может погружаться в жидкость.

Следует упомянуть и о погрешности, возникающей только на постоянном токе и вызываемой зависимостью т. э. д. с. от полярности тока, пропускаемого по нагревателю. Основной причиной изменения т. э. д. с. при перемене полярности тока в нагревателе следует считать эффект Томсона, т. е. смещение вдоль нагревателя картины распределения температуры, вызываемое проходящим по нагревателю постоянным током. Рациональной конструкцией и технологией изготовления термозлементов возможно снизить изменение т. э. д. с. до 0,02 ÷ 0,03%, а погрешность измерения тока до еще меньшей величины.

Кроме рассмотренных выше погрешностей, вносимых измерительной аппаратурой, большую роль играют случайные погрешности, вызываемые неустойчивостью самого измеряемого напряжения или тока. При поверке приборов случайные колебания измеряемой величины препятствуют установке стрелки на поверяемую отметку шкалы, затягивая измерения и снижая их точность. При поверке точных приборов необходимо исключать эти погрешности, повторяя измерения и вычисляя среднее. Одновременно повторение измерений можно использовать и для исключения влияния несимметрии термоэлемента и индуктированных токов. Для этого в каждой точке производится четыре измерения при разных сочетаниях направления постоянного тока и фазы переменного тока.

4. Описание аппаратуры

Автору было поручено руководство работой, целью которой являлось внедрение в поверочную практику термоэлектрического метода поверки амперметров и вольтметров при повышенных частотах. Требовалось создать аппаратуру, пригодную для поверки приборов класса 0,2 и 0,5 с пределами измерения до 300 в по напряжению и до 10 а по току, при частоте от 50 до 20 000 гц. Метод в том виде, как он описан в статье М. С. Каяндер [5], т. е. с применением сборной схемы из элементов, являющихся обычным оборудованием лаборатории, уже не мог считаться достаточным, так как он требует подбора и обеспечения поверочной установки вакуумными и воздушными термоэлементами, компенсатором, гальванометром, делителем напряжения, образцовыми сопротивлениями для измерения силы тока, безреактивным магазином сопротивления, источником переменного тока, регулируемого в широких пределах по амплитуде и частоте, и т. д. Сборка схемы также сложна, так как необходимо принимать меры предосторожности, чтобы избежать погрешностей от рассмотренных выше причин, иногда трудно выявляемых.

Устранение указанных затруднений было достигнуто созданием готовой к действию установки, укомплектованной всей необходимой измерительной и вспомогательной аппаратурой, включенной в схему, смонтированную с учетом необходимых предосторожностей.

В основу методики были положены принципиальные схемы измерения силы тока и напряжения, приведенные на рис. 1, а и 1, в, т. е. был принят вакуумный термоэлемент, включаемый при измерении напряжения последовательно с магазином сопротивления, а при измерении силы тока — параллельно безреактивному шунту. Было сочтено целесообразным отказаться от схемы рис. 1, б из-за недостатков, свойственных воздушным термоэлементам. К ним относится, во-первых, значительная тепловая инерция, особенно большая в термоэлементах на пять и более ампер, имеющих нагреватели из проволоки довольно большого диаметра; во-вторых, трудно устранимая зависимость т. э. д. с. от времени включения тока, вызываемая постепенным нагреванием колодок и воздуха, окружающего нагреватель. Воздушные термоэлементы хуже вакуумных также и в отношении зависимости т. э. д. с. от направления постоянного тока. К этому следует добавить, что один вакуумный термоэлемент с добавочным сопротивлением и шунтами, применяемый по схемам рис. 1, а и 1, в, перекрывает все пределы измерения как по напряжению, так и по силе тока; при небольшой стоимости вакуумных термоэлементов можно их иметь несколько штук, в случае аварии с термоэлементом он может быть просто заменен

запасным. Иметь же в запасе целый набор воздушных термозащитных элементов на различные силы тока затруднительно, поэтому при выходе из строя воздушного термозащитного элемента пришлось бы его ремонтировать, что значительно дороже и сложнее. Все эти соображения привели к решению применить при измерении силы тока вакуумный термозащитный элемент с несколькими шунтами, тем более, что, как показывает теоретическая и опытная проверка, погрешности из-за реактивности шунтов могут быть сделаны очень малыми.

Разработанная аппаратура для измерения силы тока и напряжения включает кроме вакуумного термозащитного элемента все остальные необходимые элементы, а именно:

а) устройство для сравнения измеряемых величин переменного тока с одноименными величинами постоянного тока термозащитным методом. Это устройство в соответствии с выполняемой им ролью названо нами „термозащитным компаратором“;

б) аппаратура для регулирования и точного измерения величины постоянного тока;

в) источник переменного тока регулируемой частоты ($50 \div 20\,000$ гц), дающий мощность, достаточную для питания поверяемого и образцового приборов.

Для практического применения аппаратуры требуется только наличие источников постоянного тока, а также сети переменного тока.

В создании аппаратуры принимал участие ряд сотрудников ВНИИМ, конструкторского бюро при ВНИИМ и завода „Эталон“¹. Описание основных элементов разработанной аппаратуры приводится ниже.²

Вакуумные термозащитные элементы. При создании указанной выше аппаратуры большое внимание было уделено разработке технологии изготовления термозащитных элементов. После ряда опытов с воздушными термозащитными элементами было решено отказаться от их применения. Поэтому основное внимание было направлено на разработку вакуумных термозащитных элементов.

Разработка технологии изготовления вакуумных термозащитных элементов на 10 ма велась в содружестве с сотрудником Ленинградского физико-технического института АН СССР С. В. Лузгиным. В дальнейшем на заводе „Эталон“ Э. В. Ловцюсом были освоены вакуумные термозащитные элементы на 10 ма и созданы под руководством автора термозащитные элементы на номинальную силу тока 3 ма, позволившие довести нижний предел измерения силы тока до 1 ма и напряжения — до $0,2$ в.

Нагреватель термозащитного элемента выполнен из нихромовой проволоки и намотан в виде соленоида на стеклянный трубчатый изолятор; внутрь изолятора вставлена хромель-копелевая термопара. Все это заключено в стеклянный баллон, из которого удален воздух. Термозащитный элемент, подобно электронной лампе, снабжается цоколем, с помощью которого он вставляется в ламповую панель и включается в цепь. Номинальное значение развиваемой термозащитными элементами электродвижущей силы колеблется в пределах от 10 до 13 мв, следовательно, превышенные температуры рабочего спая термопары не превосходят $140 \div 180^\circ$ С. Это определяет способность термозащитных элементов выдерживать перегрузку до

¹ Наиболее активное участие в решении ряда принципиальных вопросов принимал канд. техн. наук Д. И. Зорин; оформление конструкции было осуществлено под руководством инж. С. Я. Полякова; в экспериментальных исследованиях узлов существенную помощь оказала Е. К. Вессо-Адо.

² Аппаратура выпускается заводом „Эталон“ под наименованием „Установка для поверки амперметров и вольтметров типа УППТ-1“ и „Источник переменного тока звуковой частоты типа ИЗЧ-2“.

100% от номинального значения тока. Некоторые характеристики термоэлементов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики	Термоэлементы	
	на 10 мА	на 3 мА
Сопротивление нагревателя (ом)	60	170
Сопротивление термопары (ом)	7	18
Минимальный доступный измеренно ток при пороге чувствительности 0,03% (мА)	4	1
Т. э. д. с. при номинальном токе (мВ)	10,5—13	12,1—13,4
Температурный коэффициент термоэлектродвижущей силы (проц/град)	—0,28	—0,3
Время изменения т. э. д. с. до 99,97% от полного изменения:		
при включении тока, равного номинальному (сек)	22	12
то же при выключении (сек)	37	15
Испытательное напряжение изоляции между нагревателем и термопарой (В)	500	500

Вакуумные термоэлементы, входящие в комплект изготовляемой заводом „Эталон“ установки, представлены на рис. 4.

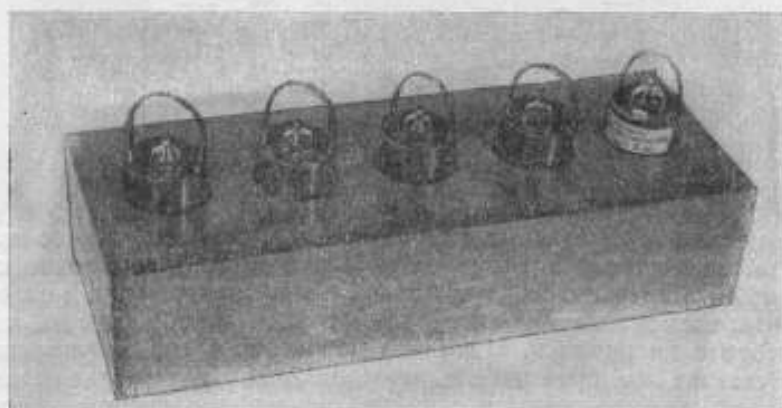


Рис. 4. Вакуумные термоэлементы, входящие в комплект установки типа УППТ-1 завода „Эталон“.

Термоэлектрический компаратор. Центральным узлом установки является термоэлектрический компаратор (в дальнейшем для сокращения будем обозначать т. э. к.). Электрическая схема т. э. к. представлена на рис. 5. Она делится на две части: переменного и постоянного тока. Первая часть состоит из вакуумного термоэлемента ТЭ, безреактивного магазина сопротивления и наружного шунта Ш. Вторая часть представляет упрощенный компенсатор постоянного тока с регулируемым рабочим током. Последний, проходя по постоянному сопротивлению 10 ом, создает падение напряжения, компенсирующее т. э. д. с. Показания миллиамперметра mA в цепи рабочего тока пропорциональны измеряемой э. д. с., и шкала может быть програду-

ирована непосредственно в милливольтгах. В качестве указателя компенсации служит отдельный переносный зеркальный гальванометр типа ГПЗ-2 завода „Эталон“.

Разработка схемы и конструкции т. э. к. велась исходя из следующих основных требований:

- а) уменьшение всякого рода погрешностей;
- б) простота и удобство пользования;
- в) уменьшение продолжительности измерений;
- г) компактность.

Конструктивно т. э. к. оформлен в виде небольшого прибора, на верхней панели которого размещены рукоятки магазинов сопротивлений, реостатов и переключателей, а также зажимы и кнопки. Кроме

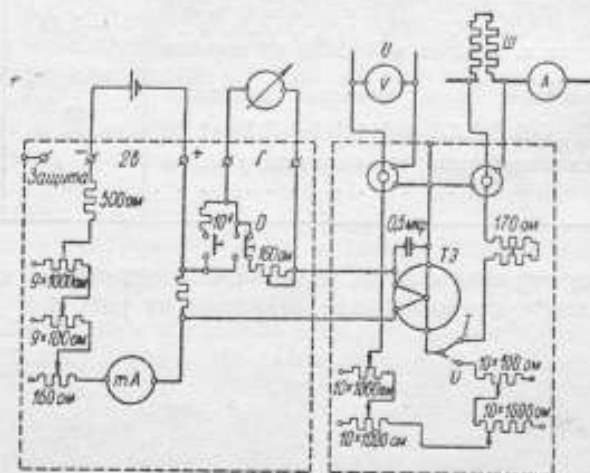


Рис. 5. Принципиальная схема термоэлектрического компаратора.

того, в верхнюю панель вмонтирован стакан для вакуумного термоэлемента, заливаемый трансформаторным маслом и герметически закрываемый завинчивающейся крышкой. Отвинтив крышку, можно вынуть термоэлемент вместе с цоколем от электронной лампы, к ножкам которого он припаян. Цоколь вставляется в гнездо укрепленной на дне стакана ламповой панели, провода от которой выведены из стакана через металло-керамические изоляторы, впаянные в отверстия в дне стакана. Такое устройство, позволяя легко производить смену термоэлементов, обеспечивает хороший контакт его выводов с проводниками схемы. Поскольку места контакта находятся в масле, практически устраняются могущие возникнуть в них термоэлектродвижущие силы.

Безреактивный магазин, включаемый последовательно с термоэлементом при измерении напряжения, состоит из четырех декад с общим сопротивлением $31\,000\ \text{ом}$ в расчете на наибольшее измеряемое напряжение $300\ \text{в}$ и номинальную силу тока термоэлемента приблизительно $10\ \text{ма}$. Применены три декады по $10\,000\ \text{ом}$, так что на каждую из 30 катушек приходится мощность, не превышающая $0,1\ \text{вт}$. По соображениям, изложенным в разделе „Теоретическая оценка погрешностей“, магазин и термоэлемент помещены внутри электростатического экрана и, кроме того, заэкранирован весь входной проводник высокого напряжения.

Для измерения силы тока предусмотрен набор из девяти наружных безреактивных шунтов на номинальный ток 0,025, 0,05, 0,1, 0,25, 0,5, 1, 2,5, 5 и 10 *a* и на номинальное падение напряжения 1 *v* и одна соединительная колодка, позволяющая включать в цепь тока нешунтированный термозлемент. Цепь внутри компаратора, параллельная шунту, состоит из термозлемента и реостата с бифилярной намоткой, позволяющего поддерживать ток в термозэлементе на желаемом уровне при изменении в некоторых пределах тока в шунте. Для переключения термозлемента из цепи шунта в цепь безреактивного магазина служит переключатель „сила тока—напряжение“.

Упрощенный компенсатор, применяемый в т. э. к., состоит, как уже упоминалось, из десятиомной катушки, регулировочного сопротивления и миллиамперметра. Наименьшее сопротивление компенсатора 500 *ом*, наибольшее — 10 500 *ом*; следовательно, при питании от двух-

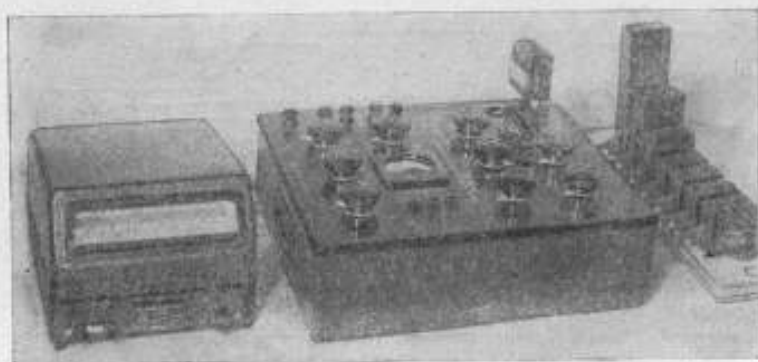


Рис. 6. Термозлектрический компаратор с принадлежностями.

вольтового аккумулятора сила тока может изменяться в пределах от 0,2 до 4 *ма*. Проходя по катушке 10 *ом*, этот ток может создавать компенсационное напряжение от 2 до 40 *мв*. Учитывая, однако, что в современных термозлементах при нормальных условиях т. э. д. с. едва ли превысит 25 *мв*, предел измерения миллиамперметра выбран равным 2,5 *ма*. Шкала его проградуирована непосредственно в значениях падения напряжения на катушке, которому при компенсации будет равна измеряемая т. э. д. с.

Чтобы повысить надежность результатов измерения и вместе с тем сократить число требуемых измерений, в установке применено два отдельных гальванометра — один для упрощенного компенсатора т. э. к., другой — для внешнего компенсатора, служащего для измерения силы тока и напряжения на постоянном токе. Наличие двух гальванометров позволяет производить измерение интересующей величины постоянного тока в тот же самый момент, когда создаваемое ею значение т. э. д. с. равно зафиксированному на внутреннем компенсаторе.

Часть т. э. к., относящаяся к постоянному току, снабжена отдельным экраном и на панель выведен соединенный с этим экраном зажим „защита“. Экран служит для защиты цепи внутреннего компенсатора от проникновения паразитных токов.

Термозлектрический компаратор, набор шунтов к нему и гальванометр типа ГПЗ-2 показаны на рис. 6.

Аппаратура для регулирования и измерения величины постоянного тока (силы тока и напряжения). Термозлектрический компаратор

входит составной частью в общую конструкцию стенда, содержащего все необходимые элементы для регулирования и точного измерения величин постоянного тока, а также переключающие устройства для получения требуемых схем. Источник переменного тока регулируемой частоты для питания поверяемого и образцового приборов не входит в конструкцию и выполнен в виде отдельной стойки, располагаемой рядом с установкой и соединяемой с ней кабелем.

Блок-схема установки представлена на рис. 7. В верхней части изображена цепь, питаемая от источника переменного тока звуковой частоты (ИЗЧ). Эта цепь заканчивается на переключателе рода тока, к которому подведены еще две цепи — цепь регулируемого постоянного

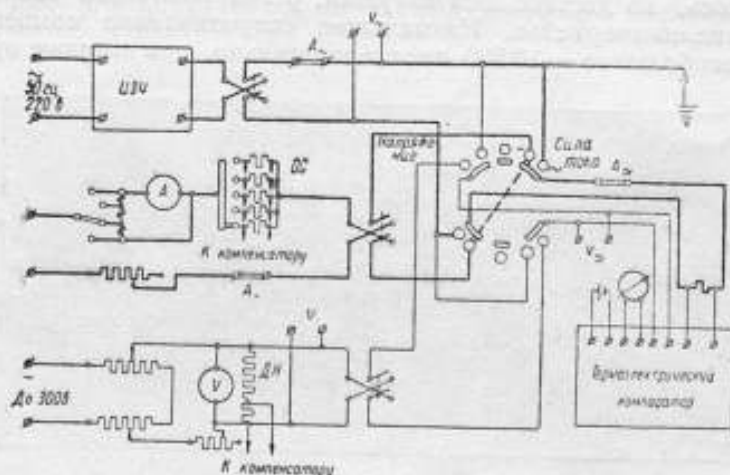


Рис. 7. Блок-схема установки УПП-1.

тока до 10 а и цепь регулируемого напряжения до 300 в. В цепь тока включен набор образцовых сопротивлений (ОС), служащих для точного измерения силы тока с помощью компенсатора постоянного тока, и амперметр с набором шунтов, а также реостаты для плавной регулировки тока. В цепи напряжения предусмотрен делитель напряжения (ДН), вольтметр и три реостата, позволяющие весьма плавно регулировать напряжение.

Переключатель рода тока позволяет включать в цепь т. э. к. либо переменный, либо постоянный ток, причем предусмотрены отдельные положения переключателя для проверки амперметров („сила тока“) и для проверки вольтметров („напряжение“).

В случае поверки приборов, могущих включаться только в цепь переменного тока, они присоединяются к зажимам A_{\sim} или V_{\sim} (в зависимости от вида прибора), приборы постоянно-переменного тока присоединяются к зажимам A_{\sim} или V_{\sim} . Зажимы A_{\sim} и V_{\sim} предусмотрены для включения образцовых приборов в тех случаях, когда не требуется предельно высокой точности измерений и можно не пользоваться компенсатором, например, при поверке приборов класса 1; 1,5 и 2,5. В этом случае поверяемые приборы переменного тока „сличаются“ с приборами постоянного тока, но не непосредственно, а через промежуточное звено — термоэлектрический компаратор.

На рис. 8 показан внешний вид этой установки. Она выполнена в виде деревянного стола-бюро с выдвижной шторой. В горизонтальной

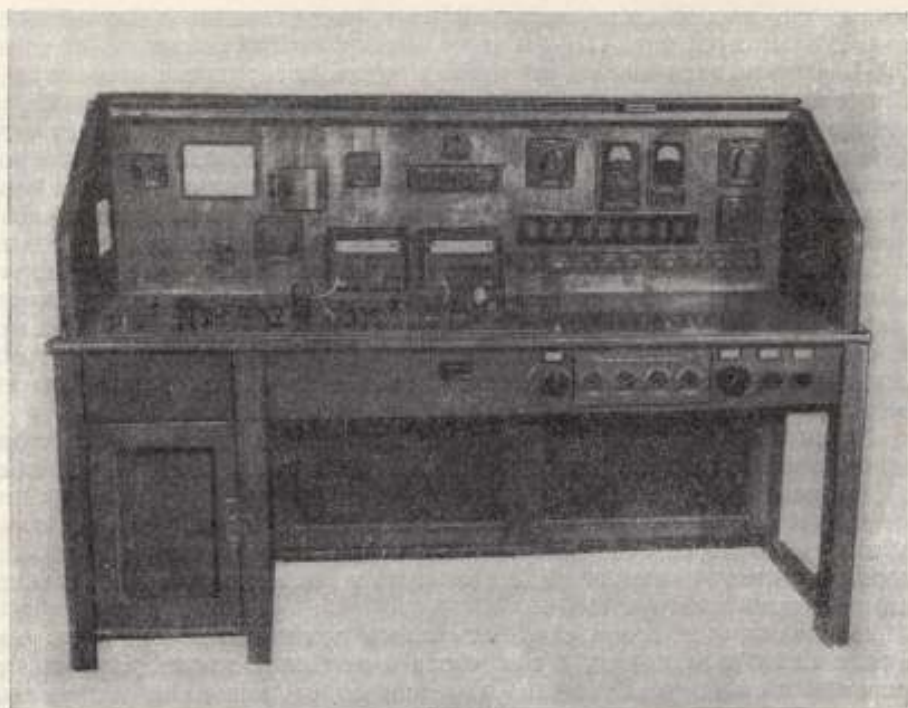


Рис. 8. Установка УППТ-1. Вид спереди с открытой шторкой.

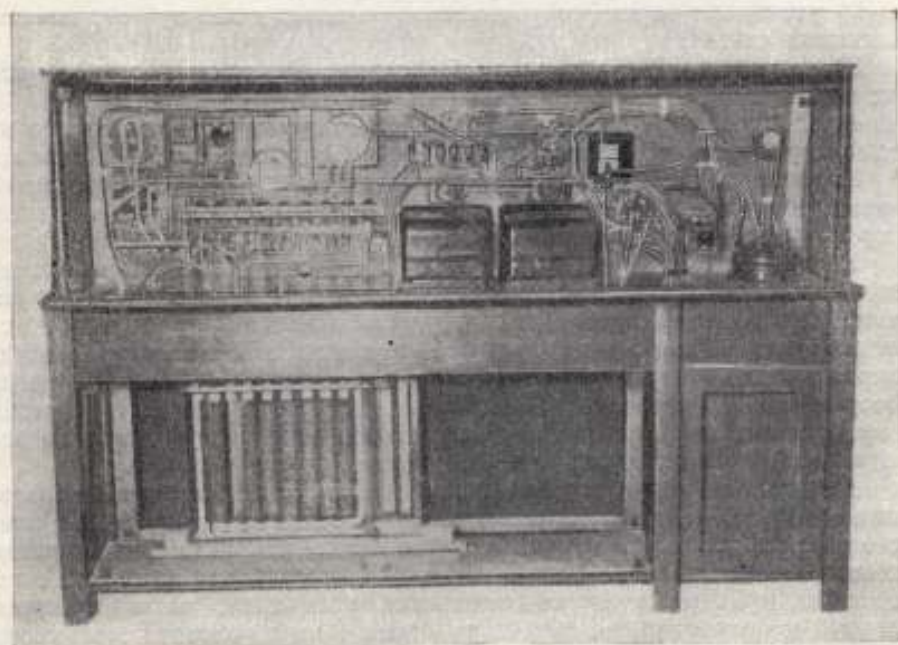


Рис. 9. Установка УППТ-1. Вид сзади со снятой задней шторкой.

доске стола, в соответствующих вырезках, расположены основные приборы: компенсатор типа ПН-4 и термоэлектрический компаратор типа ТЭК-1. Остающаяся свободной правая часть поверхности стола предназначена для поверяемого прибора (а также для образцового стрелочного прибора в случае измерений меньшей точности). На втором плане установлены два гальванометра и ванна с образцовыми сопротивлениями. В задней части стола-бюро во всю его длину имеется вертикальная панель, на которой смонтированы все переключатели, контрольные приборы и колодки с зажимами для присоединения поверяемых приборов. Нормальный элемент помещен на особой полочке и прикрыт съемным кожухом. Штурвалы реостатов, расположенных под горизонтальной крышкой стола, размещены на передней вертикальной панели вблизи от поверяемого прибора, так же как и регулировочное устройство для малых сил тока. Делитель напряжения расположен за задней вертикальной панелью. Он виден на рис. 9 справа.

Установка соединяется кабелем с источником переменного тока, не показанным на рис. 8 и 9. Кабель располагается рядом с установкой, с правой стороны.

Установка рассчитана на участие в поверке двух человек; один из них наводит стрелку прибора на поверяемую отметку шкалы, а второй производит измерение с помощью термоэлектрического компаратора и компенсатора ПН-4.

Поскольку установка разрабатывалась для поверки приборов различных классов точности, в том числе и наиболее точных, при конструировании ее было обращено самое серьезное внимание на уменьшение всех видов погрешностей, рассмотренных выше. Но кроме погрешностей, возникающих на переменном токе, могут появиться помехи, снижающие точность измерений, и на постоянном токе. Помехи могут быть вызваны:

- 1) паразитными термоэлектродвижущими силами;
- 2) утечками через сопротивление изоляции между отдельными участками схемы;
- 3) затекающими в установку блуждающими токами от посторонних источников;
- 4) электростатическими зарядами, могущими появляться при известных условиях на изолирующих поверхностях приборов установки.

Влияние паразитных термоэлектродвижущих сил и способы борьбы с ними общеизвестны; для их исключения в установке предусмотрены в требуемых местах переключатели направления тока.

Классическим приемом борьбы с утечками является улучшение изоляции. С этой целью при конструировании установки обращено внимание на выбор изолирующих материалов и изоляции проводов. Часть монтажа схемы выполнена жесткой и шины находятся в воздухе, опираясь лишь своими концами на те элементы электрических цепей, которые они должны соединять. Сами элементы цепей (переключатели и пр.) имеют, как правило, эбонитовую изоляцию. Сопротивление изоляции всей схемы должно быть не менее 10^8 ом.

Для дальнейшего уменьшения утечек в установке применена защита методом равнопотенциального экранирования, который, как известно [11], заключается в том, что все подлежащие защите участки схемы снабжаются изолированными от них и от земли металлическими экранами, причем на экраны подается потенциал, по возможности близкий к потенциалу защитных участков. В этих условиях токи утечки значительно уменьшаются, так как мала вызывающая их разность потенциалов. Особенно существенно защищать этим способом цепи гальва-

нометров и сами гальванометры, так как они являются наиболее чувствительными приборами во всей схеме.

Для реализации указанной защиты в установке все элементы электрических цепей и все изолированные провода, проложенные по дереву стенда, снабжены металлическими экранами. Экраны изолированы от стенда и соединены электрически между собой. С этой же системой экранов связаны экраны компенсатора и гальванометра. Система экранов может присоединяться к точке электрической схемы, достаточно близкой по своему потенциалу к потенциалу цепи гальванометра. Чаще всего это один из полюсов батареи, питающей цепь компенсатора.

Система экранов, которой снабжена установка, одновременно предохраняет электрические цепи от затекания блуждающих токов, вызываемых посторонними источниками. Если утечки неощутимы и требуется лишь защита от блуждающих токов, то систему экранов можно и не присоединять к какой-либо точке электрической схемы.

Электростатические заряды могут появляться на изолирующих поверхностях установки в сухую погоду вследствие трения о них одежды наблюдателя, воздействия воздушных потоков и т. д. Их мешающее действие заключается в том, что движения рук и корпуса наблюдателя могут вызывать толчкообразные отклонения гальванометра, объясняемые изменениями емкостей между частями схемы и окружающими предметами, что вызывает перераспределение зарядов. Для устранения этих явлений лучше всего защитить основной измерительный прибор, с которым приходится больше всего оперировать наблюдателю, заземленным электростатическим экраном. Тогда емкостные токи не будут проходить через цепи прибора и гальванометр и их мешающее действие будет исключено. Примененный в установке компенсатор типа ПН-4 снабжен таким экраном и соединенным с ним зажимом „земля“. В случае, когда наблюдается мешающее действие электростатических зарядов, этот зажим должен заземляться.

Источник переменного тока регулируемой частоты для питания поверяемого и образцового приборов. При разработке источника питания регулируемой частоты необходимо было решить ряд вопросов, основными из которых являются: установление интервала частот; выбор значений номинальных напряжений и токов; выбор типа источника тока; получение достаточно устойчивых во времени токов и напряжений; выяснение необходимой мощности источника; нахождение допустимого отклонения кривой тока от синусоидальной формы.

Первые четыре вопроса решались сравнительно просто, последние два потребовали специального рассмотрения.

Создаваемая аппаратура должна была удовлетворить наиболее существенные запросы практики на поверку амперметров и вольтметров, применяемых на переменном токе низкой и повышенной частоты. Верхней границей повышенной частоты, широко применяемой в настоящее время в промышленности, можно считать частоту порядка 8000—10 000 гц, однако можно ожидать в недалеком будущем и некоторого повышения этого предела. Кроме того, при исследовании свойств аппаратуры, предназначенной для определенного частотного интервала, весьма полезно иметь возможность охватывать более широкий интервал частот, в котором изучаемая зависимость проявляется более выпукло. По этим соображениям верхняя граница частотного интервала была установлена в 20 000 гц. Нижняя граница была принята равной 50 гц, поскольку в настоящее время частоты 16 $\frac{2}{3}$ и 25 гц вышли из употребления.

Предельные значения силы тока и напряжения также были выбраны исходя из практических потребностей. Приборы для непосредственного включения (т. е. без измерительных трансформаторов) редко имеют пределы, превышающие 10 *a* по току и 300 *v* по напряжению. Если возникает потребность в измерении больших токов и напряжений, обычно применяют измерительные трансформаторы. Поэтому указанные значения тока и напряжения и были выбраны в качестве предельных для создаваемой аппаратуры.

Из двух возможных видов генераторов переменного тока — машинного или лампового — явные преимущества на стороне последнего, так как один звуковой генератор покрывает всю требуемую полосу частот до 20 000 *гц*, в то время как для решения этой задачи с помощью машинных генераторов их потребовалось бы несколько. Для того, чтобы обойтись звуковым генератором обычного типа, необходимо было применить его совместно с усилителем мощности. Для повышения устойчивости во времени получаемых токов и напряжений был использован стабилизатор напряжения переменного тока. Дальнейшее повышение устойчивости в случае особо точных измерений возможно, если питание переменным током низкой частоты осуществлять не от сети, а от машинного агрегата 50 *гц* с двигателем постоянного тока, работающим от аккумуляторной батареи.

Для выяснения необходимой мощности источника были рассмотрены типы амперметров и вольтметров переменного тока. Область применения по частоте и наиболее применяемые классы точности приборов различных систем с известным приближением показаны на диаграмме рис. 10.

Наиболее распространенные электромагнитные приборы применяются при частоте до 8000 *гц*. Для низких частот строятся не только щитовые, но и лабораторные приборы класса 0,5; при повышенных частотах допустимая погрешность возрастает до 4%, и то при условии градуировки при данной частоте.

Наиболее точные электродинамические приборы сохраняют точность лишь в сравнительно узкой полосе частот (в пределах до 1000 *гц*). По большей части применение их при частоте, превышающей 2000 *гц*, не имеет смысла (речь не идет о ваттметрах, находящихся применение и при 8000 *гц*). Поэтому едва ли встретится надобность в проверке этих приборов при частоте, превышающей 500—800 *гц*.

Таким образом, можно сделать заключение, что проверка приборов классов 0,2 и 0,5 будет производиться в полосе частот, не превышающей 1000 *гц*. При более высоких частотах будут поверяться лишь приборы низших классов точности.

С точки зрения потребляемой мощности приборы следует подразделить на вольтметры, имеющие почти чисто активное сопротивление, следовательно, мало меняющие потребление с частотой (исключения представляют индукционные вольтметры, однако они редки и строятся только для частоты 50 *гц*), и амперметры, некоторые типы которых имеют потребление, зависящее от частоты.

Однако амперметры с большим потреблением мощности, а следовательно и большим падением напряжения, не будут применяться, как неудобные в эксплуатации, поэтому и источник переменного тока не должен рассчитываться на их проверку.

Произведенное обследование готовых усилителей мощности типов У-50, МРТУ-100 и ТУ-500 (цифры означают номинальную мощность в ваттах) показало, что ни один из них в существующем виде не пригоден для рассматриваемой цели: выходные трансформаторы не

обеспечивают получения требуемых значений тока и напряжения, отсутствует возможность достаточно плавного регулирования, частотные характеристики неудовлетворительны. Поэтому в ЦЗЛ завода „Эталон“ под руководством Д. И. Зорина были проведены работы, в результате которых была создана модель усилителя мощности (типа УМ-1) на выходную мощность около 30 *вт*, а затем еще одна модель (типа УМ-5) на 50 *вт*. Эта мощность достаточна не только при поверке одного прибора с помощью термоэлектрического компаратора, но в большинстве случаев и для питания двух одновременно включенных приборов, когда поверка производится путем непосредствен-

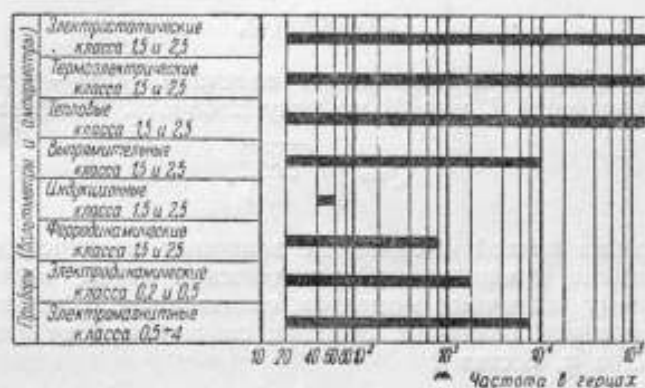


Рис. 10. Диаграмма применимости по частоте приборов различных систем.

ного сличения их друг с другом. Естественно, что могут встретиться случаи, когда мощность этого усилителя окажется недостаточной, например, при поверке амперметра с большим индуктивным сопротивлением. В таких случаях, однако, реактивное сопротивление контура поверяемого прибора может быть искусственно уменьшено включением батарей конденсаторов. Емкость, требуемая для настройки в резонанс при частоте 2000—2500 *гц*, составляет порядка 100 *мкф*. Она уменьшается по мере увеличения частоты.

Для оценки пригодности усилителя необходимо было решить и вопрос о допустимой несинусоидальности кривых тока и напряжения. Показания термоэлектрического компаратора практически не зависят от степени искажения формы кривой, поэтому фактором, ограничивающим допустимую несинусоидальность, является вызываемое ею изменение погрешностей поверяемого прибора.

Вопрос о влиянии искажений формы кривой тока на показания приборов достаточно сложен. Не претендуя на полноту его решения, изложим некоторые соображения о допустимых искажениях формы кривой тока, даваемого источником тока поверочной установки. При этом ограничимся лишь случаем поверки приборов, отклонения которых пропорциональны действующим значениям измеряемой величины и вместе с тем заметным образом зависят от частоты. К таким приборам в первую очередь относятся электромагнитные и электродинамические приборы. Требования к синусоидальности формы кривой, которые нужно ставить при поверке выпрямительных и электронных приборов, здесь не рассматриваются, поскольку эти приборы, как правило, поверяются при частоте 50 *гц*, когда в качестве источника тока

можно пользоваться непосредственно сетью, без применения лампового генератора и усилителя.

Будем исходить из выражения для вращающего момента прибора. Для электромагнитного амперметра, например, выражение имеет вид

$$D = I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha}, \quad (9)$$

в общем же виде для любого прибора (амперметра или вольтметра электромагнитной или электродинамической системы) оно напишется

$$D = Q^2 f(\alpha), \quad (10)$$

где через Q обозначена измеряемая величина, $f(\alpha)$ — частная производная от параметра L или M по углу поворота. Следовательно,

$$Q = \sqrt{\frac{D}{f(\alpha)}}. \quad (11)$$

Если форма кривой измеряемой величины несинусоидальна, вращающий момент, приложенный к подвижной части, можно представить как сумму частичных моментов, создаваемых отдельными гармониками измеряемой величины. Момент, создаваемый отдельной гармоникой порядка n , составит

$$D_n = Q_n^2 f(\alpha), \quad (12)$$

где Q_n — n -я гармоника измеряемой величины.

Введем теперь числовую характеристику степени искажения, в качестве которой примем отношение действующего значения всех высших гармоник к действующему значению всей измеряемой величины. Назовем эту характеристику коэффициентом искажения и обозначим через k :

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Q_n^2}}{Q}. \quad (13)$$

Отношение каждой отдельной гармоники ко всему значению измеряемой величины $\frac{Q_n}{Q}$ обозначим через k_n

$$k_n = \frac{Q_n}{Q}. \quad (14)$$

Следовательно, по ф-ле (13)

$$k = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} k_n^2}. \quad (15)$$

Тогда частичный вращающий момент, создаваемый гармоникой порядка n , если он будет воспроизводиться точно, без погрешности, зависящей от частоты данной гармоники,

$$D'_n = Q^2 k_n^2 f(\alpha), \quad (16)$$

а суммарный момент всех гармоник

$$D'_z = \sum_{n=1}^{\infty} D'_n = f(\alpha) Q^2 \sum_{n=1}^{\infty} k_n^2 = f(\alpha) Q^2. \quad (17)$$

Член $f(\alpha)$ имеет одно и то же значение для всех частичных моментов и поэтому может быть вынесен за знак суммы, а $\sum_{n=1}^{\infty} k_n^2 = 1$.

Так как отдельные моменты создаются токами различных частот, они воспроизводятся с относительными ошибками γ_n . Значения этих ошибок зависят от частоты, следовательно, можно написать, что

$$\gamma_n = \varphi(n) \gamma_1, \quad (18)$$

где γ_1 — относительная погрешность момента основной гармоники; $\varphi(n)$ — множитель, учитывающий характер зависимости ошибки от частоты.

Момент отдельной гармоники напишется в виде

$$D''_n = D'_n (1 - \gamma_n) = D'_n [1 - \varphi(n) \gamma_1]. \quad (19)$$

Здесь через D''_n обозначено действительное значение частичного момента.

Действительное значение суммарного момента, очевидно, может быть получено путем суммирования частичных моментов

$$D''_z = \sum_{n=1}^{\infty} D''_n = \sum_{n=1}^{\infty} D'_n [1 - \varphi(n) \gamma_1]. \quad (20)$$

Этот момент вызовет показание прибора Q' , которое будет с ним связано зависимостью вида (17)

$$D''_z = f(\alpha) Q'^2, \quad (21)$$

откуда

$$Q' = \sqrt{\frac{D''_z}{f(\alpha)}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} D'_n [1 - \varphi(n) \gamma_1]}{f(\alpha)}}. \quad (22)$$

Относительная погрешность прибора

$$\frac{\Delta Q}{Q} \approx \frac{Q' - Q}{Q'} = \frac{\sqrt{D''_z} - \sqrt{D'_z}}{\sqrt{D'_z}}. \quad (23)$$

Подставляя значения суммарных моментов, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} D'_n [1 - \varphi(n) \gamma_1]} - \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} D'_n}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} D'_n}} = \sqrt{1 - \frac{\gamma_1 \sum_{n=1}^{\infty} [D'_n \varphi(n)]}{\sum_{n=1}^{\infty} D'_n}} - 1 \approx \\ &\approx -\frac{\gamma_1}{2} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} [D'_n \varphi(n)]}{\sum_{n=1}^{\infty} D'_n}. \end{aligned} \quad (24)$$

Подстановка значений сумм дает

$$\frac{\Delta Q}{Q} = -\frac{\gamma_1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [k_n^2 \varphi(n)] = -\frac{\gamma_1}{2} \left\{ k_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} [k_n^2 \varphi(n)] \right\}. \quad (25)$$

Выражение (25) соответствует общей погрешности, вызываемой всеми гармониками, включая и основную. При синусоидальной кривой, для которой $n=1$ и $k_n = k_1 = 1$, и прежнем действующем значении величины погрешность

$$\frac{\Delta Q}{Q} = -\frac{\gamma_1}{2}. \quad (26)$$

Погрешность, вызванная появлением только высших гармоник,

$$\Delta \gamma = \frac{\Delta Q}{Q} - \frac{\Delta Q_1}{Q_1} = -\frac{\gamma_1}{2} \left\{ \sum_{n=2}^{\infty} [k_n^2 \varphi(n)] - (1 - k_1^2) \right\}. \quad (27)$$

Так как $k_1^2 = 1 - \sum_{n=2}^{\infty} k_n^2$, то предыдущее выражение упрощается

$$\Delta \gamma = -\frac{\gamma_1}{2} \left\{ \sum_{n=2}^{\infty} [k_n^2 \varphi(n)] - \sum_{n=2}^{\infty} k_n^2 \right\} = -\frac{\gamma_1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} k_n^2 [\varphi(n) - 1]. \quad (28)$$

Это и есть общее выражение для дополнительной погрешности, вызванной искажением формы кривой для случая приборов с квадратичной зависимостью вращающего момента от измеряемой величины.

Рассмотрение материалов экспериментального изучения частотной зависимости электромагнитных и электродинамических амперметров и вольтметров, полученных в Лаборатории электрических измерений ВНИИМ канд. техн. наук М. С. Каяндер, дает возможность установить, что вид функции $\varphi(n)$ не сохраняется одинаковым не только для различных типов приборов, но и для разных отметок шкалы одного и того же прибора. Полученные М. С. Каяндер кривые зависимости погрешностей приборов от частоты показывают, что в наиболее неблагоприятных случаях дополнительная погрешность приблизительно пропорциональна квадрату частоты, следовательно, можно принять, что в ур-нии (18)

$$\varphi(n) = n^2. \quad (29)$$

Для этого случая

$$\Delta \gamma = -\frac{\gamma_1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} k_n^2 (n^2 - 1). \quad (30)$$

Дальнейший анализ можно вести лишь задавшись конкретными значениями k_n . Не вдаваясь в рассмотрение всего многообразия возможных форм кривых, разберем два частных случая, дающих заведомо преувеличенную погрешность.

С точки зрения увеличения допустимого значения коэффициента искажения k наиболее неблагоприятным был бы случай, когда имеется только одна гармоника большого порядкового номера. При желании сделать вызываемую ею погрешность меньше некоторой заданной

величины пришлось бы обеспечить достаточно малое значение коэффициента искажения. При той же допустимой погрешности, но при условии, что имеется несколько гармоник, из которых часть имеет сравнительно низкую частоту, предельное значение коэффициента k будет больше.

Очевидно, что влияние формы кривой возрастает при большой частотной погрешности прибора, т. е. при большом значении γ_1 . С другой стороны, требования к точности определения погрешностей, т. е. к точности измерений при поверке, могут понижаться по мере роста значений погрешностей. Примем, что погрешность от искажения формы кривой может определяться не точнее чем до 0,05 от ее величины.

Например, если основная погрешность прибора достигает 1%, дополнительная его погрешность, возникающая при поверке по причине несинусоидальности формы кривой тока усилителя, должна быть не более 0,05%.

Эти условия являются достаточно жесткими с точки зрения требований к чистоте кривой тока, питающего приборы в момент поверки, и вместе с тем обеспечивают достаточно высокую точность поверки приборов.

Подсчитаем теперь допустимые значения k для указанных выше двух случаев.

1. Одна гармоника порядка n . Формула (30) приобретает вид

$$\Delta \gamma = -\frac{\gamma_1}{2} k_n^2 (n^2 - 1). \quad (31)$$

Из ф-лы (31) можно определить значение коэффициента искажения

$$k = k_n = \sqrt{\frac{2 \Delta \gamma}{\gamma_1 (n^2 - 1)}}. \quad (32)$$

Для различных значений n и для принятого нами отношения $\frac{\Delta \gamma}{\gamma_1} = 0,05$ получаем табл. 3.

2. Несколько гармоник с различными порядковыми номерами. Рассмотрим частный случай наличия пяти гармоник, вызывающих одинаковые погрешности, равные $\frac{1}{5} \Delta \gamma$. По формуле (30) для каждой из пяти гармоник можно написать

$$\frac{1}{5} \Delta \gamma = -\frac{1}{2} \gamma_1 k_n^2 (n^2 - 1) \quad (33)$$

или

$$k_n = \sqrt{\frac{2 \Delta \gamma}{5 \gamma_1 (n^2 - 1)}}. \quad (34)$$

Таблица 3

Порядковый номер гармоники n	Коэффициент искажения $k = \sqrt{\frac{0,1}{n^2 - 1}} \cdot 100$
2	18
3	11
4	8
5	6
6	5
7	4

Принимая снова $\frac{\Delta \gamma}{\gamma_1} = 0,05$, можно составить таблицу для допустимых значений k_n и подсчитать значения k для различных комбинаций гармоник (табл. 4).

Таблица 4

Порядковый номер гармоники n	Коэффициент гармоники $k_n = \sqrt{\frac{0,02}{n^2 - 1}} \cdot 100$ в %	Коэффициент искажения $k = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} k_n^2}$ в %	Порядковый номер гармоники n	Коэффициент гармоники $k_n = \sqrt{\frac{0,02}{n^2 - 1}} \cdot 100$ в %	Коэффициент искажения $k = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} k_n^2}$ в %
2	8	Для $n = 2, 3, 4, 5, 6$ $k = 11$	7	2,0	Для $n = 5, 6, 7, 8, 9$ $k = 4,9$
3	5		8	1,8	
4	3,6	Для $n = 3, 5, 7, 9, 11$ $k = 6,2$	9	1,6	—
5	2,8		10	1,4	
6	2,4	11	1,3	—	

Приведенные табл. 3 и 4 позволяют сделать заключение, что для обычных случаев проверки амперметров и вольтметров электродинамической и электромагнитной систем можно пользоваться источником с формой кривой тока, характеризующейся коэффициентом искажения не выше 5%. При этом изменение погрешности поверяемого прибора, вызванное искажением кривой питающего его тока, не превзойдет 0,05 от величины самой погрешности.

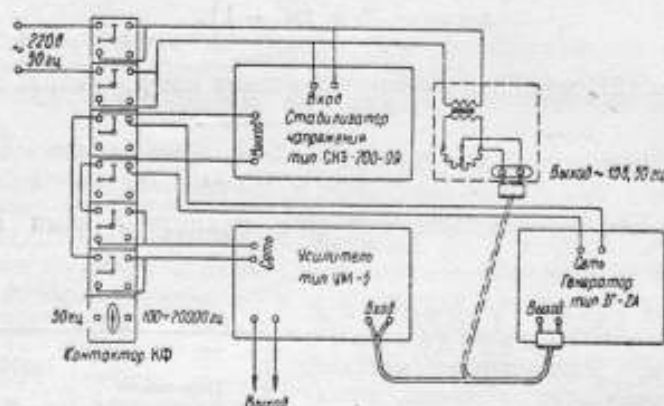


Рис. 11. Блок-схема источника тока звуковой частоты типа ИЗЧ-2

Не останавливаясь на подробном описании усилителя типа УМ-5, укажем лишь на следующие его особенности, имеющие непосредственное отношение к использованию для проверки приборов.

Для получения токов до 10 а и напряжений до 300 в выходные трансформаторы усилителя имеют ряд секций, дающих напряжения 6, 12, 25, 150 и 300 в. В зависимости от требуемой частоты тока включается один из двух выходных трансформаторов. Один из них рассчитан на полосу частот 50 → 3000 гц, второй — на полосу 2000 → 20 000 гц. Грубая и плавная регулировка выходного напряжения осуществляется двумя реостатами на входе усилителя, а также реостатом, регулирующим выходное напряжение звукового генератора.

Таким образом, основными элементами источника тока звуковой частоты являются звуковой генератор и усилитель мощности. Как по-

казано выше, коэффициент искажения источника тока не должен превышать 5%. Это условие может быть выполнено, если звуковой генератор дает искажения не более 1% и усилитель — не более 4%, что в действительности и достигнуто.

Усилитель мощности и генератор составляют основные элементы разработанного источника звуковой частоты типа ИЗЧ-2, блок-схема которого приведена на рис. 11.

Для повышения устойчивости напряжения генератор и усилитель включены через феррорезонансный стабилизатор напряжения мощностью 500 вольт-ампер. Ввиду того, что при частоте, близкой к 50 гц, фон 50 гц вызывает биения и сильно мешает, в источнике питания типа ИЗЧ-2 предусмотрена возможность подачи на вход усилителя частоты сети переменного тока через маленький понижающий трансформатор и регулировочный реостат. К сожалению, трансформатор этот нельзя включать через стабилизатор напряжения во избежание сильных искажений формы кривой, поэтому следует считаться с тем, что неустойчивость выходного напряжения усилителя во время работы при частоте 50 гц может быть выше, чем при других частотах. При проверке приборов, мало зависящих от частоты, это неудобство можно обойти, работая при частоте 53—54 гц, при которой влияние биений становится незаметным.

Конструктивно источник тока звуковой частоты оформлен в виде вертикальной стойки (рис. 12), в которой друг над другом расположены: стабилизатор напряжения (внизу), усилитель мощности (в середине) и звуковой генератор (в данном случае генератор типа ЗГ-2А, вверху). Как уже сказано, стойка располагается рядом с установкой УППТ-1, справа от нее, и соединяется с ней кабелем. Кабель сплетен из многих изолированных проводов небольшого сечения, чем достигается уменьшение его индуктивности. Опыт показал, что кабель, изготовленный из двух проводов большого сечения, вследствие относительно большой площади петли, обладает при повышенной частоте настолько большим индуктивным сопротивлением, что сильно ограничивает предельную силу тока, которую можно получить в контуре установки.

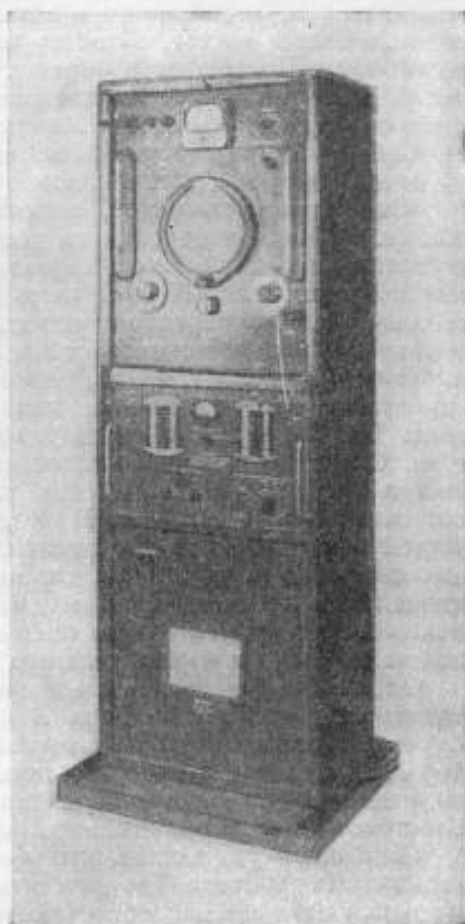


Рис. 12. Внешний вид источника тока звуковой частоты типа ИЗЧ-2.

5. Определение погрешностей, вносимых разработанной аппаратурой

В процессе разработки и изготовления первой опытной установки, а также после изготовления заводом „Эталон“ ряда серийных установок производились их испытания. Испытания, в основном, заключались в определении погрешностей, вносимых термоэлектрическим компаратором, работающим в комплекте с остальными частями установки, в полосе частот, на которую рассчитана установка, т. е. от 50 до 20 000 гц. Погрешности определялись сравнением результатов измерений на установке с показаниями прибора, заведомо не зависящего от изменений частоты. Можно рассматривать два вида испытаний: а) оценку погрешности, вносимой при измерении напряжения, и б) оценку погрешности, вносимой при измерении силы тока.

Оценка погрешностей, вносимых т. э. к. при измерении напряжения. Процесс измерения на установке может рассматриваться как состоящий из двух частей, характеризующих свойственной каждой из них погрешностью. Первая часть заключается в том, что на т. э. к. воздействуют поочередно измеряемым напряжением переменного тока и напряжением постоянного тока, причем величину последнего регулируют так, чтобы т. э. д. с. термоэлемента приняла значение, зафиксированное при включении измеряемого напряжения переменного тока. Вторая часть сводится к измерению напряжения постоянного тока. Очевидно, что наибольший интерес представляет оценка погрешностей первой части, так как точность измерений компенсатором постоянного тока известна. В разделе „Теоретическая оценка погрешностей“ были рассмотрены возможные причины погрешностей сравнения переменного тока с постоянным и было показано, что нет принципиальных препятствий к тому, чтобы сделать эти погрешности весьма малыми. Экспериментальная оценка погрешностей, вносимых т. э. к., показала, что и в самом деле это так.

Оценка производилась сравнением показаний т. э. к. с показаниями электростатического прибора. В качестве последнего в большинстве случаев применялся многокамерный электростатический вольтметр на 150 в, а изучение и подгонка термоэлектрического компаратора № 1 на минимальную погрешность производились с помощью квадрантного электрометра в схеме двойного включения.

Само собой разумеется, что оба эти прибора непригодны для оценки абсолютных значений напряжения с высокой точностью. Поэтому методика определения погрешностей т. э. к. основана на использовании лишь двух свойств этих приборов: независимости показаний от частоты и способности точно воспроизводить одно и то же показание после небольшого и кратковременного смещения указателя. Первое свойство определяется самим принципом действия. Для обеспечения второго свойства принимаются специальные меры. При измерениях с многокамерным вольтметром применяется микроскоп, жестко установленный на штативе и наведенный на определенное место шкалы. С его помощью можно весьма точно воспроизводить показания вольтметра, один раз при включении напряжения переменного тока, а второй раз при включении напряжения постоянного тока. Значение последнего устанавливается заранее так, чтобы при быстром переключении с одного рода тока на другой стрелка вольтметра почти не изменяла своего положения и была исключена возможность изменения противодействующего момента подвеса за счет изменений его угла закручивания.

При измерениях, произведенных с помощью электрометра, длина светового указателя достигала 2,5 м и поэтому точность воспроизведения показаний была весьма высока.

Методика определения погрешностей заключается в том, что напряжение переменного тока, вызывающее заданное показание электростатического вольтметра и создающее определенную э. д. с. термоэлемента, быстро заменяется напряжением постоянного тока, вызывающим прежнее показание вольтметра. Это напряжение измеряют компенсатором и принимают за действительное значение измеряемого напряжения. Затем его изменяют настолько, чтобы э. д. с. термоэлемента приняла зафиксированное ранее значение, и вновь измеряют напряжение компенсатором, принимая его значение за показание т. э. к. Очевидно, что разность между вторым и первым значениями напряжения и будет равна погрешности, вносимой термоэлектрическим компаратором.

Для исключения влияния несимметрии термоэлемента, контактной разности потенциалов между электродами вольтметра и случайных колебаний напряжения производится серия наблюдений при различных сочетаниях положений переключателей полярности и фазы напряжений постоянного и переменного токов и за результат измерения принимается среднее.

Эта методика применена для изучения погрешностей ряда термоэлектрических компараторов (свыше десяти экземпляров). Для каждого компаратора определены погрешности при нескольких частотах (50, 1000, 5000 и 20 000 гц) и при различных добавочных сопротивлениях к термоэлементу (10 000, 20 000 и 30 000 ом), соответствующих номинальным значениям измеряемого напряжения 100, 200 и 300 в. Большое число полученных результатов может быть после обработки представлено следующими данными (табл. 5).

Таблица 5

Значение добавочного сопротивления к термоэлементу в ом	Номинальное напряжение в в	Частота в гц	Средняя арифметическая погрешность (среднее из абсолютных значений погрешности) в %	Наибольшая относительная погрешность в %
30 000	300	0,05	0,033	0,03
30 000	300	1	0,030	0,08
30 000	300	5	0,040	0,095
30 000	300	20	0,026	0,08
20 000	200	20	0,026	0,08
10 000	100	20	0,020	0,08

Из табл. 5 видно, что измеренные погрешности ни для одного из экземпляров т. э. к. не превышают 0,1%, что и соответствует установленным для них техническим требованиям. Обращает на себя внимание отсутствие зависимости данных таблицы от частоты, что едва ли можно объяснить действительными свойствами испытуемых приборов. Объяснение следует искать в относительно больших случайных погрешностях измерений, вызываемых колебаниями питающего напряжения, так как испытания производились при питании ИЗЧ-2 от сети. Несмотря на наличие стабилизатора напряжения, колебания напряжения усилителя в этих условиях достигают нескольких десятых долей процента, и это вызывает заметный разброс результатов.

Для более точного выяснения погрешностей, вносимых т. э. к. при измерении напряжения, экземпляр т. э. к. № 1 был подвергнут дополнительному исследованию, причем определялись изменения его показаний при переходе от частоты 1000 гц к данной. В качестве частотно-независимого компаратора был применен квадрантный электрометр в схеме двойного включения. Для повышения устойчивости напряжения переменного тока источник тока звуковой частоты типа ИЗЧ-2 получал энергию от двигатель-генератора, приводимого во вращение от аккумуляторной батареи большой емкости; напряжение постоянного тока подавалось от отдельной батареи аккумуляторов. Результаты этих более тщательных измерений приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения добавочного сопротивления к термоэлементу в ом	Номинальные значения измеряемого напряжения в в	Частота в гц			
		0,2	1	5	20
		Погрешности, вносимые т. э. к., в %			
30 000	300	0	0	-0,018	-0,055
20 000	200	-0,005	0	-0,021	-0,038
10 000	100	-0,010	0	0	0

В столбцах таблицы приведены относительные изменения показаний т. э. к. при переходе от одной частоты к другой, причем условно принято, что при частоте 1000 гц т. э. к. не дает погрешности. Основанием для выбора частоты 1000 гц в качестве основной послужило то, что примененный в этих опытах термоэлемент на 3 ма обладает меньшей тепловой инерцией, чем обычный на 10 ма, и при низкой частоте может иметь так называемую низкочастотную погрешность, возникающую из-за пульсаций температуры нити.

Из таблицы видно, что погрешность т. э. к. без специальной подгонки достигает при измерении напряжения приблизительно 0,05%, причем ее отрицательный знак, соответствующий уменьшению показаний т. э. к. при повышении частоты, свидетельствует об индуктивном характере добавочного сопротивления. Была предпринята компенсация этой погрешности включением конденсаторов параллельно двум высшим декадам. Результаты измерений после регулировки приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения добавочного сопротивления к термоэлементу в ом	Включенные декады (считая от термоэлемента)	Частота в гц				
		0,05	0,1	0,2	1	20
		Погрешности, вносимые т. э. к. № 1, в %				
30 000	$R_2 = R_3 = R_4 = 10\ 000\ \text{ом}$	-	-	+0,007	0	-0,009
25 000	$R_2 = R_3 = 10\ 000;$ $R_4 = 5000$	+0,012	-	-	0	-0,001
20 000	$R_2 = R_3 = 10\ 000;$ $R_4 = 0$	-0,005	-	-	0	+0,007
15 000	$R_1 = 10\ 000;$ $R_2 = 5000$	-0,002	-	-	0	-0,004
10 000	$R_1 = 10\ 000$	-	0,001	-	0	+0,003

Как видно из табл. 7, наибольшее изменение показаний т. э. к. во всей полосе частот от 0,05 до 20 кгц нигде не превышает 0,012%.

Все описанные испытания т. э. к. дают основание сделать заключение, что погрешности, вносимые т. э. к. при измерении напряжения, могут быть уменьшены до весьма малых значений, не превышающих 0,01 → 0,02% во всем диапазоне частот от 50 до 20 000 гц. Практически, однако, столь высокая точность едва ли может быть использована, так как, во-первых, случайные погрешности вследствие неустойчивости напряжения, питающего ИЗЧ-2, легко могут превзойти по величине систематические погрешности т. э. к. и, во-вторых, в особо точных измерениях при частоте 20 000 гц нет надобности, так как приборов класса 0,2 и 0,5, применяемых при этой частоте, пока еще не встречается.

Таблица 8

Номинальные токи шунтов	Погрешности, вносимые т. э. к. при частоте 20 кгц		Метод оценки
	Средняя арифметическая погрешность в % (среднее из абсолютных значений погрешности)	Наибольшая погрешность в %	
10	0,043	0,090	Сравнение с воздушными термоэлементами
5	0,031	0,070	
2,5	0,016	0,060	
1	0,026	0,060	
0,5	0,013	0,040	
0,25	0,020	0,080	
0,1	—	0,011	Расчет по постоянной времени
0,05	—	0,008	
0,025	—	0,005	

Так как частотная погрешность т. э. к. в соответствии с ф-лой (1) пропорциональна квадрату частоты, из данных табл. 6 можно сделать заключение, что в полосе частот до 3000 → 5000 гц она не превышает 0,01 → 0,02% даже без какой-либо специальной регулировки т. э. к. Вопрос о величине „низкочастотной“ погрешности различных типов термоэлементов требует дополнительного изучения.

Таблица 9

Оценка погрешностей, вносимых т. э. к. при измерении силы тока. Погрешности, вносимые шунтированным термоэлементом, для основной части шунтов определяются сравнением с воздушными (нешунтированными) термоэлементами, номинальные токи которых близки к номинальным токам шунтов. Погрешности шунтов на малые силы тока, не поддающиеся измерению воздушными термоэлементами, определяются

Элемент цепи	Сопротивление в ом	Постоянная времени τ в микросекундах
Шунт на 0,1 а	12	+ 10 ... + 30
Шунт на 0,05 а	25	+ 20 ... + 28
Шунт на 0,025 а	60	+ 10 ... + 16
Цепь термоэлемента при разных сопротивлениях бифилярного резистора	60	+ 17
	100	- 25
	170	- 134

косвенно, путем измерения постоянной времени цепей шунта и вакуумного термоэлемента.

По материалам испытания ряда изготовленных термоэлектрических компараторов (свыше десяти экземпляров) составлена табл. 8, из которой видно, что погрешность, вносимая т. э. к. при измерении силы тока, ни для одного из экземпляров не превышает 0,09%, причем здесь также присутствует некоторая случайная погрешность, вызываемая неустойчивостью переменного тока.

Цифры последних трех строк подсчитаны по ф-ле (7), исходя из значений постоянной времени шунтов и цепи термоэлемента, приведенных в табл. 9, для наиболее неблагоприятного случая включения всего бифилярного реостата. Практически такой случай едва ли встре-

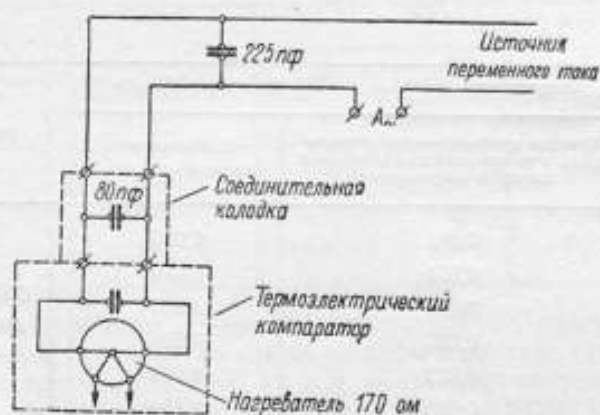


Рис. 13. Часть цепи переменного тока установки, используемая при измерениях малых сил тока нешунтированным термоэлементом.

чается, обычно работа происходит при сопротивлении реостата не более 100—120 *ом*. В этом случае погрешность становится пренебрежимо малой.

При измерении малых токов нешунтированным термоэлементом, например при проверке миллиамперметров, параллельно термоэлементу оказывается включенной емкость между проводами соединительной колодки и бифилярно проложенными в стенде установки шинами, соединяющими зажимы для амперметра переменного тока и т. э. к. (см. схему части цепи переменного тока на рис. 13, с указанием значений емкости для одной из серийных установок). Ток через эту емкость не проходит по термоэлементу, но проходит по поверяемому миллиамперметру, если он включен к зажимам *A*-, и может вызвать погрешность. Однако, как сказано на стр. 30, погрешность при частоте 20 000 *гц* достигает 0,01% лишь при шунтирующей емкости, равной 600 *пф*. В данном же случае емкость равна всего около 350 *пф* и погрешность может составить не более 0,003%.

Тем не менее, поскольку эта погрешность в данном случае является доминирующей над остальными систематическими погрешностями, желательно ее также уменьшить. С этой целью в установку внесено небольшое изменение, позволяющее перенести место включения миллиамперметра ближе к термоэлементу. При этом емкость шин шунтирует оба прибора: и термоэлемент, и миллиамперметр,

а потому она перестает вносить погрешность. Изменение заключается в том, что в соединительной колодке один из проводников разрезан и концы его выведены гибкими проводниками. Разрезан провод, соединенный с незаземленным концом термоэлемента. В случае применения такой колодки поверяемый миллиамперметр присоединяется к проводникам, выходящим из нее. Зажимы „Амперметр переменного тока“ замыкаются перемычкой накоротко. Термоэлемент шунтируется лишь емкостью в 32 пф, и погрешность, вызываемая ею, уменьшается до пренебрежимо малой величины.

Выводы

1. Работы, проведенные в Лаборатории электрических измерений ВНИИМ по исследованию различных методов измерения переменных токов и напряжений, закончились созданием установки для поверки амперметров и вольтметров при переменном токе низкой и повышенной частоты, основанной на термоэлектрическом методе.

2. В основу разработки положен вариант метода, в котором для измерения силы тока и напряжения используется один и тот же вакуумный термоэлемент (термопреобразователь), включаемый при измерении напряжения последовательно с безреактивным добавочным сопротивлением, а при измерении силы тока — параллельно безреактивному шунту. Принятие этого варианта позволило упростить схему и обойтись без неудобного в применении набора воздушных термопреобразователей на различные силы тока.

3. В разработанную установку входит полный комплект аппаратуры, необходимой для поверки амперметров и вольтметров, включая и источник переменного тока повышенной частоты для питания цепей поверяемого и образцового приборов. Установка обеспечивает возможность измерения напряжения от 0,2 до 300 в и силы тока от 0,001 до 10 а при частоте от 50 до 20 000 гц.

4. В процессе работы изучены основные источники погрешностей и разработаны конструктивные приемы борьбы с ними. По данным испытаний свыше десяти серийных установок, погрешность, вносимая термоэлектрическим компаратором, ни в одной из точек не превышает 0,1%, как правило, оставаясь значительно ниже. При более тщательных исследованиях с понижением влияния случайных погрешностей, вызываемых неустойчивостью измеряемой величины, погрешность не превышает: при частоте до 10 000 гц — 0,02%, при частоте от 10 000 до 20 000 гц — 0,04%.

5. На основании результатов работы заводом „Эталон“ налажен выпуск установок описанного типа, что позволило оснастить ими ряд поверочных учреждений страны и создать условия для освоения этими учреждениями поверки амперметров и вольтметров всех классов точности при переменном токе низкой и повышенной частоты, производившейся ранее только во ВНИИМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Papalexі N., ETZ 25 (1904), 1066; Ann. d. Physik 14 (1904), 756; Mandelstamm L. u. Papalexі N., Ann. d. Phys., 33 (1910), 490; Rosa E. B., NBS Bulletin 3 (1906), 43; Harris F. K., NBS Journ. of Res., 3 (1923), 445; Silsbee F. S., Res. Paper 411 of the NBS.; Park J. N. and Lewis A. B., NBS Journ. of Res. 25 (1940), No5; Shottler a. Hawkes, J.I.E.E. 93 (1946), 549.
2. Schultze H., Zeitschr. f. Instrumentenkunde 27 (1907), 65, 28 (1908), 61; Orlich, Zeitschr. f. Instrk-de, 29 (1909), 33, 30 (1909), 435, 466, 29 (1909), 24; Patterson, Rayner, Kinnes, J.I.E.E., 51 (1913), 294.

3. Безикович А. Я., Труды ВНИИМ, вып. 14 (74), Машгиз, 1953.
4. Rump, W., Elektrotechnik, Berlin, 5 (1951), 64.
5. Hermach F. L., Trans. A.I.E.E., 67 (1948), 1224, NBS Journ. of Res., 48 (1952), Febr.; Benson F. A., The Electrician, CXLVI (1951), No 14 (3799).
6. Sewig R., Werkmeister G., Zeitschr. f. techn. Phys., 22 (1941), 248.
7. Schrader H. I., ETZ, Ausg. A, 73 (1952), 547.
8. Чечулин А. А., Сб. „Электрические и магнитные измерения“, изд. „Стандартизация и рационализация“, Ленинград, 1934.
9. Широков К. П., Труды ВНИИМ, вып. 6 (66), Машгиз, 1949.
10. Спичин Б. С., Научные записки Львовского политехнического института, 1949, № 4.

А. Я. БЕЗИКОВИЧ

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОВЕРКИ ВАТТМЕТРОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Введение

До настоящего времени измерение мощности с высокой степенью точности производилось только на постоянном токе. Поэтому наиболее точные ваттметры электродинамической системы поверялись на постоянном токе. Правильность их показаний на переменном токе нормальной частоты обеспечивается компенсацией угловой погрешности параллельной цепи ваттметра.

Естественно, что с расширением диапазона частоты величина погрешности, обусловленная сдвигом фаз в параллельной цепи, возрастает и, кроме того, сказывается ряд явлений, приводящих к погрешностям, которыми в диапазоне частот до 50 гц можно пренебречь. Специальной конструкцией, с одной стороны, и подбором материалов, из которых изготовлены детали приборов, с другой, можно уменьшить величины погрешности, вызванные этими явлениями. Однако, как показывает опыт исследования электродинамических ваттметров классов точности 0,1, 0,2, 0,5, погрешности их, обусловленные изменением частоты, довольно значительны, и, естественно, что метод аттестации ваттметров на постоянном токе, пригодный для использования приборов в диапазоне частот до 50 гц, при более высоких частотах неприемлем.

Описанный в литературе [1] метод отдельного определения составляющих частотной погрешности недостаточно прост и приводит в ряде случаев к ошибочным результатам.

Компенсационный метод на переменном токе, как показывают исследования, проведенные во ВНИИМ [2], нецелесообразно применять при существующих типах компенсаторов даже для поверки амперметров и вольтметров. Одновременное же измерение тока, напряжения и угла сдвига между ними еще более затрудняет работу, поэтому для целей измерения мощности компенсатор переменного тока неприемлем при современном состоянии источников питания и существующих типах компенсаторов.

Для разрешения поставленной задачи следовало найти частотно-независимый метод, обеспечивающий достаточную точность и не требующий сложных манипуляций при производстве измерений.

Этим требованиям может удовлетворить термoeлектрический метод.

1. Термоэлектрический метод

В качестве основного элемента термоэлектрической схемы избран термоваттметр, принципиальная схема которого изображена на рис. 1, где приняты следующие обозначения:

ТП1 — термопреобразователь № 1;

ТП2 — термопреобразователь № 2;

$R_{ш}$ — сопротивление шунта;

R_A — добавочное сопротивление;

i — мгновенное значение тока, проходящего по последовательной цепи ваттметра;

u — мгновенное значение напряжения, приложенного к параллельной цепи ваттметра;

i_u — ток в нагревателях термопреобразователей, пропорциональный мгновенному значению приложенного напряжения u ;

i_i — ток в нагревателях, пропорциональный мгновенному значению тока i .

Как видно из схемы (рис. 1), по нагревателю одного из термопреобразователей (*ТП1*) проходит сумма токов $i_i + i_u = i_1$, а по

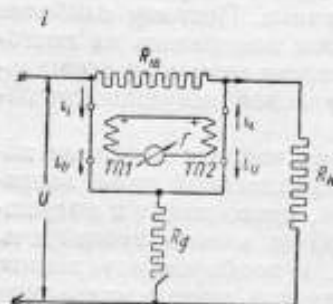


Рис. 1.

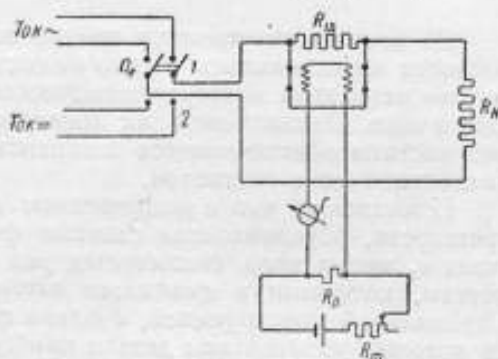


Рис. 2.

нагревателю второго (*ТП2*) — их разность $i_i - i_u = i_2$. Если при этом сами термоэлементы включить встречно, то ток через гальванометр G , а следовательно, и его отклонение будут пропорциональны разности электродвижущих сил термопар. Если вольтамперные характеристики термопреобразователей имеют квадратичный характер, то отклонение гальванометра будет пропорционально мощности

$$(i_i + i_u)^2 - (i_i - i_u)^2 = 4i_i i_u = A_0 u i = A_0 P.$$

Легко доказать, что показание термоваттметра, осуществленного по схеме рис. 1, будет пропорционально величине мощности в нагрузке R_N , увеличенной на половину потери мощности в шунте.

Погрешность измерения термоэлектрического ваттметра, как и всякого прибора с термопреобразователем, не может быть сделана в настоящее время меньше 1,5–2%, что обуславливается неустойчивостью характеристик термопреобразователей.

Для повышения точности измерения необходимо изменить методику так, чтобы прежде всего исключить неопределенность, связанную с предварительной градуировкой термопреобразователя, и устранить погрешность стрелочного прибора, заменив его компенсатором постоянного тока.

Неопределенность предварительной градуировки термопреобразователя устраняется применением градуировки, производимой на постоянном токе в момент, следующий непосредственно за измерением (рис. 2). Для этого термоэлектрический ваттметр включается в цепь переменного тока. В зависимости от измеряемой мощности в нагрузке R_n , величина разностной термоэлектродвижущей силы (т. э. д. с.) в термоваттметре принимает то или иное значение e_+ , которое фиксируется с помощью компенсатора постоянного тока $KПТ$ (положение 1 переключателя $П_1$). Затем термоваттметр переключают в специально созданную вспомогательную цепь постоянного тока, причем источники для питания последовательной и параллельной цепи ваттметра могут быть разделенными, так что требуемая мощность источников постоянного тока невелика. Регулировкой величины тока в последовательной

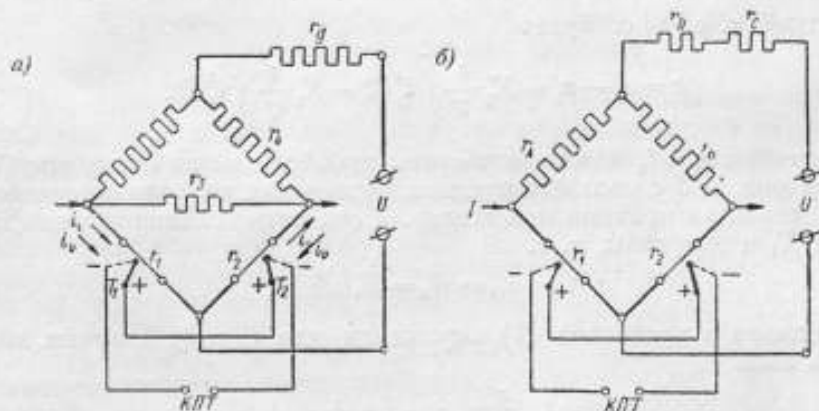


Рис. 3.

цепи и напряжения в параллельной добиваются того, чтобы разностная т. э. д. с. термоваттметра стала равной т. э. д. с. на переменном токе e_+ .

В рассматриваемом случае равенство величин разностных т. э. д. с. для постоянного и переменного токов будет говорить о равенстве величин мощности, если только поправочный член, обусловленный потерей мощности в шунте, останется неизменным. Это, в свою очередь, возможно, если действующее значение тока при переходе с переменного тока к постоянному останется неизменным. Степень точности, с которой устанавливается неизменность величины тока, должна быть той же, с которой определяется неизменность величины разностной т. э. д. с. термоваттметра. Таким образом, методика измерения мощности усложнена дополнительной операцией — фиксированием неизменности величины тока. Если термоэлектрический метод применяется для поверочных целей, то от этого усложнения можно избавиться. При этом схема включения приобретает вид, изображенный на рис. 3. Эта схема применима только при питании ее от отдельных источников питания цепи тока и цепи напряжения. При этом нагреватели термопреобразователей поставлены в такие же условия, как и в схеме измерения мощности, так что разностная т. э. д. с. в схеме с разделенными цепями эквивалентна разностной т. э. д. с. при ваттметровом способе включения термоваттметра.

Как показывает подробный анализ схемы рис. 3, а, разностная т. э. д. с. будет пропорциональна только величине мощности и не

зависит от потерь в шунте. Рассмотрим схему рис. 3, а. Здесь r_1 и r_2 — сопротивления соответственно первого и второго нагревателей двух термопреобразователей; r_3 и r_4 — сопротивления, равные друг другу по величине; они предназначены для создания искусственной средней точки на шунте $r_5 = R_{ш}$. В остальном обозначения соответствуют рис. 1.

При квадратичном характере вольтамперных зависимостей в термопреобразователях между т. э. д. с. e_1 , e_2 и токами в нагревателях i_1 , i_2 существуют зависимости вида

$$e_1 = K_1 \frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt \quad \text{и} \quad e_2 = K_2 \frac{1}{T} \int_0^T i_2^2 dt.$$

Разностная т. э. д. с. будет

$$e = e_2 - e_1 = K_2 \frac{1}{T} \int_0^T i_2^2 dt - K_1 \frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt. \quad (1)$$

Величины i_1 и i_2 можно вычислить, преобразовывая схему рис. 3, а в схему рис. 3, б с соответствующим пересчетом величин сопротивлений и используя принцип наложения. Если в выражении (1) коэффициенты K_1 и K_2 равны, т. е.

$$K_1 = K_2 = K, \quad (2)$$

то, подставив в уравнение (1) выражения для i_1 и i_2 , получим зависимость вида

$$e = \int_0^T f(ui, u^2, i^2) dt. \quad (3)$$

При

$$r_1 = r_2; \quad (4)$$

$$r_A = r_B \quad (4')$$

после интегрирования будем иметь

$$e = AU \cos \varphi, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{2Kr_A^2}{(r_A + r_1)^2 [2(r_C + r_D) + (r_A + r_1)]}.$$

Как показывает выражение (5), разностная т. э. д. с. при схеме включения (рис. 3, а) пропорциональна только величине мощности и не зависит от потерь в шунте, если выполнены условия (2), (4) и (4').

Таким образом, если в выбранном методе перехода от переменного тока к постоянному току имеет место равенство величин разностных т. э. д. с., то это значит, что равны и величины мощности. Следовательно, измерив с помощью либо образцового прибора, либо компенсационным методом мощность постоянного тока, можно утверждать, что она будет равна мощности переменного тока. Действительно, в случае постоянного тока величина разностной т. э. д. с. e_- определяется выражением:

$$e_- = AU_- I_- = AP_-, \quad (6)$$

в случае переменного тока — выражением:

$$e_{-} = \frac{1}{T} \int_0^T Aiu dt = AP_{-} \quad (7)$$

Равенство величин т. э. д. с. $e_{-} = e_{+}$ приводит к равенству:

$$P_{+} = P_{-}, \quad (8)$$

что доказывает возможность применения метода перехода от переменного тока к постоянному. Задача измерения мощности в этом случае становится подобной задаче измерения тока и напряжения на переменном токе при нормальной и повышенной частоте. Последняя задача решена во ВНИИМ применением термоэлектрического метода.

2. Источники погрешности измерения мощности термоэлектрическим методом

При измерении мощности термоэлектрическим методом возможно появление ряда погрешностей, которые обуславливаются неуравновешенностью термоваттметра, реактивностью элементов схемы, приводящей к угловой погрешности термоваттметра, отклонением вольтамперных характеристик термопреобразователей от квадратичных. Рассмотрим влияние каждой из этих погрешностей независимо друг от друга.

Погрешность, происходящая от неуравновешенности термопреобразователей. Разностная т. э. д. с. термоваттметра, осуществленного по схеме рис. 3, а, пропорциональна мощности только при выполнении условий (2), (4) и (4'). Для подобных характеристик термопреобразователей условие (2) означает, что эти характеристики совпадают. Проверить выполнение этого условия можно, осуществив последовательное соединение нагревателей термопреобразователей и встречное включение термопар. Автоматически это соединение получается, если отключить добавочное сопротивление термоваттметра. При подобных характеристиках и $K_1 = K_2$ разностная т. э. д. с. будет равна нулю. Так как добиться такой согласованности только на основании подбора термопреобразователей затруднительно, то применяется искусственный прием (рис. 4), заключающийся в шунтировании некоторым сопротивлением R_y нагревателя того из термопреобразователей, э. д. с. которого больше. Регулируя сопротивление R_y до тех пор, пока разностная т. э. д. с. не станет равной нулю, добиваются совмещения характеристик термопреобразователей в одной точке. Для подобных друг другу характеристик совпадение их в одной точке означает совпадение и во всех точках. Операция эта в дальнейшем называется уравниванием термопреобразователей по току.

Сопротивление R_y должно быть безреактивным, так как в противном случае при переходе с переменного тока на постоянный достигнутое уравнивание вольтамперных характеристик обоих термопреобразователей нарушается. В этом случае появится дополнительная

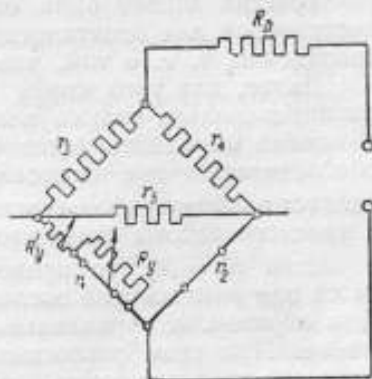


Рис. 4.

разностная т. э. д. с. при равенстве токов в нагревателе одного термопреобразователя и в термопреобразователе, шунтированном сопротивлением R_y , что, естественно, внесет погрешность в измерения.

Характеристики термопреобразователей, изготовленных для измерения мощности, очень близки друг к другу, поэтому сопротивление R_y имеет порядок около 10 000 ом. Изготавливается оно в виде унифицированно намотанного реостата, постоянная времени которого не превосходит $1 \cdot 10^{-7}$ сек. При этом изменение эквивалентного сопротивления (нагреватель, шунтированный сопротивлением R_y) не превосходит в диапазоне частот до 10 000 гц $2 \cdot 10^{-6}\%$, т. е. величины, лежащей за пределами точности метода. Это заключение возможно проверить опытным путем. Добившись равновесия термопреобразователей по току в случае, когда по их нагревателям проходит постоянный ток, переключают схему на переменный ток частоты 10 000 гц; если при этом достигнутое равновесие не нарушится, то это означает, что шунтирующее сопротивление R_y практически не изменяется в этом диапазоне частот.

Если вольтамперные характеристики двух термопреобразователей совпадают в одной точке, то, как показывает исследование двух термопреобразователей специальных типов, наибольшее отклонение характеристик может быть оценено величиной порядка 0,02%, что с достаточной для практических целей точностью свидетельствует о их совпадении, т. е. о том, что $K_1 = K_2$.

Далее, для того чтобы разностная т. э. д. с. термоваттметра была пропорциональна только величине мощности, кроме условия (2), необходимо выполнить условия (4) и (4'). Последнее из этих условий обеспечивается при изготовлении прибора. Сопротивления r_A и r_B находятся в совершенно одинаковых эксплуатационных условиях, поэтому в процессе работы равенство $r_A = r_B$ не будет нарушено.

Если $K_1 = K_2$, то проверка выполнения условия $r_1 = r_2$ производится при разомкнутой последовательной цепи термоваттметра следующим образом. К параллельной цепи ваттметра прикладывается напряжение. При этом разностная т. э. д. с. должна быть равной нулю. Если она не равна нулю, то последовательно с нагревателем одного из термопреобразователей, как правило, шунтированного сопротивлением R_y , включается некоторое сопротивление R'_y (рис. 4). Регулируя это сопротивление, можно добиться искусственно равенства нулю разностной т. э. д. с. Так как величина этого сопротивления мала (около одного ома), то оказалось возможным выполнить его в виде реохорда постоянной индуктивности, величина которой очень мала; следовательно, изменением его сопротивления при переходе с постоянного тока к переменному частотой до 10 000 гц можно пренебрегать.

Эта операция в дальнейшем будет называться уравниванием термоваттметра по напряжению.

Отсутствие уравновешенности по току. Отсутствие уравновешенности по току ($K_1 \neq K_2$) сказывается на результатах измерения более резко, чем отсутствие уравновешенности по напряжению, так как в этом случае погрешность измерения мощности будет определяться появлением членов, зависящих от квадрата тока и от квадрата напряжения.

Правильные результаты при применении метода перехода от измерений на переменном токе к измерениям на постоянном токе будут иметь место только в случае, если значения тока или напряжения будут сохраняться неизменными. Степень точности, с которой уста-

навливается эта неизменность, должна быть той же, с которой устанавливается неизменность разностной т. э. д. с.

Можно легко определить величину относительной погрешности измерения мощности δ_p , обусловленной тем, что $K_1 \neq K_2$.

Предположим, что

$$K_2 = K_1(1 + \Delta). \quad (9)$$

Величину разностной т. э. д. с. для переменного тока e_- получим, если в выражение (1) подставим выражение (9) и проинтегрируем его. Далее определим величину разностной т. э. д. с. на постоянном токе e_- , приравняв $e_- = e_-$, как того требует методика измерения, можем вычислить величину относительной погрешности измерения мощности δ_p , которая может быть определена следующим выражением

$$\delta_p = A_1 \frac{\Delta}{4} \frac{I_-^2 - I_+^2}{P_n} + \frac{\Delta}{4A_1} \frac{U_-^2 - U_+^2}{P_n}, \quad (10)$$

где $A_1 = \frac{r_A(r_1 + r_A + 2r_C + r_D)}{r_A + r_1}$ — постоянная, определяемая параметрами схемы;

I_+ и I_- — соответственно значение постоянного тока и действующее значение переменного тока;

U_+ и U_- — соответственно действующее значение переменного напряжения и величина напряжения постоянного тока;

P_n — номинальное значение измеряемой мощности.

Из выражения (10) видно, что погрешность измерения мощности при $\cos \varphi = 1$ в данном методе практически отсутствует, так как значения I_+ и I_- , так же как U_+ и U_- могут быть очень близки друг к другу.

В случае измерений при $\cos \varphi < 1$ погрешность возрастает. Величину этой погрешности можно вычислить для конкретных параметров схемы. Коэффициент при члене, зависящем от квадрата тока, значительно больше коэффициента при втором члене. Поэтому при $\cos \varphi < 1$ выгоднее изменять при переходе к постоянному току напряжение, оставляя ток неизменным.

Отсутствие уравновешенности по напряжению. Отсутствие уравновешенности термопреобразователей по напряжению, при выполненном условии $K_1 = K_2 = K$, скажется на результатах измерения мощности меньше, чем в первом случае, так как погрешность будет определяться только появлением членов в выражении для разностной т. э. д. с., зависящих от квадрата напряжения. Однако в процессе работы, вследствие неодинакового режима, в котором находятся нагреватели обоих термопреобразователей, происходит неодинаковое изменение величины их сопротивления, что, в свою очередь, приводит к нарушению уравновешенности по напряжению. При этом необходимо учитывать члены, зависящие от напряжения, или исключить их влияние, поддерживая неизменной величину напряжения с высокой степенью точности при переходе от переменного тока к постоянному. Естественно, что этот прием очень усложнил бы методику измерения мощности, а следовательно, нежелателен.

Погрешность в общем виде можно получить для случая $K_1 = K_2$ и $r_A = r_B$, если предположить, что $r_2 = r_1(1 + \Delta')$.

Относительная погрешность измерения мощности δ_p' , обусловленная нарушением уравновешенности по напряжению, как показывает расчет, аналогичный расчету относительной погрешности δ_p , будет

$$\delta_p' = \frac{\Delta \cdot A}{4} \frac{I^2 - I_{\Sigma}^2}{P_{\Sigma}} + \frac{\Delta}{4A} \frac{U^2 - U_{\Sigma}^2}{P_{\Sigma}}. \quad (11)$$

Как и следовало ожидать, наименьшей погрешность δ_p' будет в том случае, если сохраняются неизменными величины напряжения при переходе с переменного тока на постоянный.

Для того, чтобы выяснить примерную величину погрешности, вызываемой разбалансировкой моста при прохождении тока по нагревателям, были сняты зависимости сопротивлений нагревателей от величины проходящего тока. Оказалось, что изменение их сопротивлений при изменении тока от i_{\min} до i_{\max} не превосходит 0,02%, что, как видно из приведенного выражения для погрешности, не даст сколь угодно заметного искажения результатов.

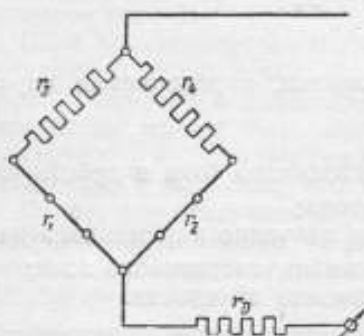


Рис. 5.

Угловая погрешность термоваттметра. Угловая погрешность термоваттметра обуславливается сдвигом фаз:

а) между напряжением, приложенным к параллельной цепи термоваттметра, и токами в нагревателях, пропорциональными ему;

б) между током в последовательной цепи термоваттметра и токами в нагревателях, пропорциональными ему.

Любое сопротивление обладает некоторой остаточной реактивностью, которую невозможно полностью устранить.

Наличие остаточной реактивности в параллельной цепи термоваттметра приводит к двум явлениям:

а) изменяет ток в параллельной цепи сравнительно с постоянным током на определенную величину, зависящую от частоты;

б) сдвигает фазу тока в нагревателях сравнительно с приложенным напряжением на величину, также зависящую от частоты.

Последовательная цепь термоваттметра состоит из шунта, по которому проходит основной ток, и двух параллельных цепей: последовательно соединенных нагревателей обоих термопреобразователей и двух последовательно соединенных катушек сопротивления по 100 Ом каждая.

Наличие реактивности в последовательной цепи приводит:

а) к перераспределению токов в ней;

б) к изменению сдвига фаз между токами в шунте и в нагревателях. Оба эти явления также приводят к появлению погрешности.

Вычислим величину этой погрешности порознь для обеих цепей.

Параллельная цепь термоваттметра изображена на рис. 5. Каждое сопротивление этой цепи обладает некоторой остаточной реактивностью и может быть представлено в виде последовательно включенных активного и реактивного сопротивлений, шунтированных емкостью. Ввиду малости величины распределенной емкости и индуктивности величину эквивалентного сопротивления можно выразить проще — через постоянную времени этого сопротивления.

Общее эквивалентное сопротивление параллельной цепи Z_0 определяется выражением

$$Z_0 = \left[r_D + \frac{1}{2} (r_1 + r_3) \right] \left[1 + j\omega \frac{r_D \tau_D + \frac{1}{2} (r_1 \tau_1 + r_3 \tau_3)}{r_D + \frac{1}{2} (r_1 + r_3)} \right], \quad (12)$$

где r_i и τ_i — активное сопротивление и постоянная времени сопротивления с соответствующим индексом.

Множитель при $j\omega$

$$\frac{r_D \tau_D + \frac{1}{2} (r_1 \tau_1 + r_3 \tau_3)}{r_D + \frac{1}{2} (r_1 + r_3)} = \tau_0 \quad (13)$$

можно рассматривать как эквивалентную постоянную времени τ_0 , т. е.

$$Z_0 = \left[r_D + \frac{1}{2} (r_1 + r_3) \right] (1 + j\omega \tau_0).$$

Относительное изменение эквивалентного сопротивления будет

$$\frac{1}{2} \omega^2 \tau_0^2. \quad (14)$$

Тангенс угла сдвига фаз, обусловленного эквивалентной постоянной времени сопротивления параллельной цепи, может быть выражен как отношение реактивной составляющей сопротивления и активной

$$\operatorname{tg} \varphi = \omega \tau_0. \quad (15)$$

Последовательная цепь термоваттметра изображена на рис. 6.

Как уже указывалось, реактивность этой цепи приводит к перераспределению токов в цепи шунта (z_0) и цепи нагревателей ($r_1 + r_2$) по сравнению с постоянным током. Назовем ток, ответвляющийся в нагреватели термомпреобразователя, I_n . Относительное изменение тока в нагревателе ΔI_n при переходе с переменного тока к постоянному, определяющее погрешность, как показывает расчет, будет

$$\Delta I_n = -\frac{1}{2} \omega^2 \tau_0'^2. \quad (16)$$

Угол сдвига фаз вектора тока в нагревателях I_n относительно вектора общего тока дается выражением

$$\operatorname{tg} \varphi_0' = \omega \tau_0'. \quad (17)$$

где τ_0' — эквивалентная постоянная времени, равная

$$\frac{r_1}{r_2 A_2} (\tau_1 - \tau_3) + \frac{2r_1}{r_3 A_2} (\tau_1 - \tau_3) = \tau_0'. \quad (18)$$

Здесь

A_2 — постоянная, определяемая параметрами схемы;

τ_i — постоянная времени сопротивлений с соответственным индексом.

Из выражения для эквивалентной постоянной времени сопротивления параллельной цепи из ф-лы (13) следует, что

$$\tau_{\min} < \tau_0 < \tau_{\max}, \quad (19)$$

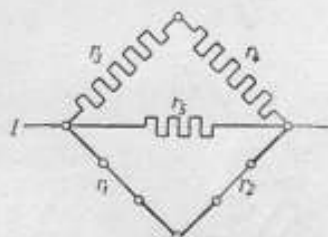


Рис. 6.

где τ_{\min} и τ_{\max} — постоянные времена сопротивлений участков цепи, обладающих соответственно наименьшей и наибольшей реактивностью. Так как постоянные времена отдельных участков не превосходят $1 \cdot 10^{-7}$ сек., то, следовательно, и $\tau_0 < 1 \cdot 10^{-7}$ сек. При этих условиях величиной изменения эквивалентного сопротивления параллельной цепи $-\frac{1}{2} \omega^2 \tau_0^2$ в интервале частот до 10 000 гц можно пренебречь.

Анализируя выражение (18) эквивалентной постоянной времени для последовательной цепи, находим, что

$$\tau_0' < \tau_1 - \tau_2.$$

Так как $\tau_2 > \tau_1$, то

$$\tau_0' < -\tau_2. \quad (20)$$

Выражение (20) означает, что эквивалентная постоянная времени последовательной цепи меньше по абсолютной величине наибольшей

постоянной времени τ_2 (τ_2 — постоянная времени шунта — имеющего сопротивление малой величины r_2 и, следовательно, обладающего большой по величине постоянной времени). Если постоянная времени шунта $r_2 = 1 \cdot 10^{-7}$ сек., то относительным изменением тока в нагревателях, при переходе с постоянного тока на переменный в диапазоне частот до 10 000 гц, можно пренебречь.

Для большей наглядности рассуждений относительно погрешностей, вносимых угловой погрешностью термоваттметра, обратимся к векторной диаграмме на рис. 7. Наличие реактивности параллельной цепи приведет к появлению сдвига фаз между

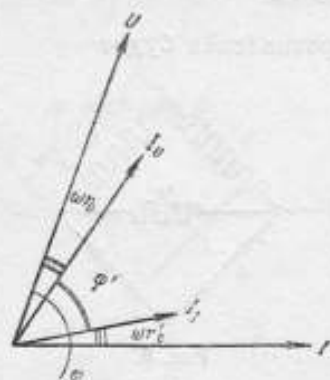


Рис. 7.

током $i_{a'}$, пропорциональным напряжению U , и напряжением U на угол, равный $\omega\tau_0'$. Ток в нагревателях оказывается сдвинутым относительно общего тока на угол $-\omega\tau_0'$. Разностная т. э. д. с. термоваттметра будет пропорциональна произведению

$$P' = A_0 I_u I_i \cos \varphi',$$

$$\varphi' = \varphi - (\omega\tau_0 - \omega\tau_0') = \varphi - \psi, \quad (21)$$

где

$$\psi = \omega\tau_0 - \omega\tau_0'.$$

Относительная погрешность в измерении величины мощности $P = UI \cos \varphi$ будет

$$\frac{P' - P}{P_n} = \cos [\varphi - (\omega\tau_0 - \omega\tau_0')] - \cos \varphi = \psi \sin \left(\varphi - \frac{\psi}{2} \right). \quad (22)$$

Из этого выражения видно, что при $\varphi = 0$ погрешность будет иметь минимальное значение и численно будет равна $\frac{\psi^2}{2}$. С увеличением угла сдвига фаз эта погрешность будет возрастать, достигая максимального значения при $\varphi = 90^\circ$ и численно будет равна величине угла ψ .

Если предположить, что постоянные времена всех сопротивлений положительны, то, как видно из выражения (21), дополнительный угол сдвига фаз, обусловленный реактивностью схемы, может оказаться

равным нулю. При условии, что $\tau_0 = -\tau_0$, $\psi = 0$, т. е. дополнительная погрешность термоваттметра станет, очевидно, также равной нулю.

Этот результат говорит о том, что нет надобности стремиться к изготовлению сопротивлений с малыми величинами постоянных времени, достаточно, чтобы они были одного знака и равными по величине.

Погрешность измерения мощности при $\cos \varphi < 1$. В случае измерений мощности описываемым методом при $\cos \varphi = 1$ строго квадратичные вольтамперные характеристики термопреобразователей не нужны. Действительно, равенства разностной т. э. д. с. на переменном токе e_{\sim} и разностной т. э. д. с. на постоянном токе e_{-} можно достичь, если имеет место равенство токов постоянного I_{-} и переменного I_{\sim} в нагревателях каждого из термопреобразователей, т. е., если имеют место равенства:

$$I_{1\sim} = I_{1-};$$

$$I_{2\sim} = I_{2-},$$

при соблюдении общего условия равенства постоянного тока I_{-} действительному значению переменного тока I_{\sim}

$$I_{-} = I_{\sim}.$$

Измерение мощности при $\cos \varphi < 1$ в описываемом методе заключается в том, что при переходе с переменного тока на постоянный следует для получения того же значения разностной т. э. д. с. уменьшить в соответствующее число раз величину тока или напряжения.

Этот метод при $\cos \varphi < 1$ будет свободен от погрешности, если между током в нагревателе и т. э. д. с. существует квадратичная зависимость, так как только при этом справедлива зависимость вида

$$e = A_0 UI \cos \varphi. \quad (23)$$

Если вольтамперные характеристики термопреобразователей не квадратичны, последнее соотношение не выполняется, что приводит к погрешности в измерениях.

Соотношение (23) дает возможность легко контролировать степень квадратичности вольтамперных характеристик термопреобразователей, т. е. достижимую с их помощью точность измерений. Для этого достаточно (при встречном включении термодпар) снять зависимость вида

$$e = f(I)_{U=\text{const}}. \quad (24)$$

Если оказывается, что выражение (24) представляет собой прямую линию, то это подтверждает, что вольтамперные характеристики квадратичны.

Оценка влияния неквадратичности вольтамперных характеристик в общем виде приводит к выражениям настолько громоздким, что они не пригодны для каких бы то ни было вычислений. Графическое решение задачи показывает, что погрешность эта значительна. Следовательно, нужно идти не по пути учета, а по пути устранения этой погрешности.

3. Способы устранения погрешности при измерениях мощности с коэффициентом мощности меньше единицы

Квадратичность вольтамперных характеристик термопреобразователей. Первым и естественным путем устранения названной погрешности является создание термопреобразователей такой конструкции,

которая обеспечила бы требуемый характер зависимости между током в нагревателе и т. э. д. с.

Из теории термоэлектрического эффекта известно, что электродвижущая сила e , возникающая в термоэлектрической цепи, состоящей из двух проводников, при малых разностях температур между горячим спаем t_1 и холодным концом пары t_2 пропорциональна первой степени этой разности, т. е.

$$e = \alpha(t_1 - t_2), \quad (25)$$

где α — коэффициент пропорциональности.

Поэтому в термопреобразователях, где подогрев горячего спаи термопары производится током, проходящим по нагревателю, при выполнении условия (25) естественно ожидать квадратичного характера вольтамперной зависимости.

В связи с тем, что сопротивление нагревателя изменяется с повышением температуры, то при постоянном температурном коэффициенте может произойти нарушение квадратичности характеристик термопреобразователей. Во избежание этого необходимо для нагревателей применять материалы с малым температурным коэффициентом и использовать режим малых температур.

Так как при соблюдении режима малых разностей температур т. э. д. с. единичной термопары мала и недостаточна для получения хорошей чувствительности, то для увеличения т. э. д. с. применяются так называемые многоэлементные термопреобразователи. В таких термопреобразователях одним нагревателем подогреваются спаи нескольких включенных последовательно термопар.

Как показывают результаты исследования многоэлементных термопреобразователей, можно достичь такого положения, при котором отступлением вольтамперных характеристик от квадратичного закона можно пренебречь с погрешностью, не превышающей сотых долей процента, что обеспечит измерение мощности при $\cos \varphi = 0,5$ с погрешностью, не превосходящей 0,2%, во всем диапазоне частот от 50 до 10 000 гц.

Способ раздельного определения т. д. э. с. обоих термопреобразователей. Возможен и второй путь устранения погрешности при измерении мощности с коэффициентом мощности меньше единицы. Идея этого метода, предложенного проф. М. И. Левиным (МГИМИП), заключается в том, чтобы измерять не разностную т. э. д. с. обоих термопреобразователей, как это имеет место в изложенном выше методе, а т. э. д. с. каждого термопреобразователя в отдельности. Для этого устанавливаются на переменном токе стрелку поверяемого ваттметра на поверяемую отметку и фиксируют величины т. э. д. с. каждого из термопреобразователей в отдельности. Затем переходят на постоянный ток и, регулируя в последовательной цепи ток, а в параллельной цепи напряжение, добиваются восстановления т. э. д. с. для каждого термопреобразователя. В соответствии со схемой включения: ток в первом нагревателе (для постоянного тока) равен

$$I_{1-} = I_i + I_u;$$

ток во втором нагревателе

$$I_{2-} = I_i - I_u.$$

Из этих выражений определяем:

$$I_i = \frac{I_{1-} + I_{2-}}{2}; \quad I_u = \frac{I_{1-} - I_{2-}}{2}.$$

Мощность, измеренная на постоянном токе,

$$P_{-} = A_0 I_a I_a = A_0 \frac{I_{1-}^2 - I_{2-}^2}{4}. \quad (26)$$

Докажем, что эта величина соответствует измеряемой мощности на переменном токе. Для этого рассмотрим векторную диаграмму рис. 8. Здесь U и I — действующие значения тока и напряжения, приложенных к ваттметру, φ — угол между этими векторами.

Величина мощности, подлежащая измерению

$$UI \cos \varphi = P_{-}.$$

При переходе от переменного тока к постоянному сохраняем $I_1 = I_1 + I_a$ и $I_2 = I_1 - I_a$ неизменными. Определим эти величины из приведенной векторной диаграммы

$$I_{1-} = \sqrt{(I_a + I_1 \cos \varphi)^2 + (I_1 \sin \varphi)^2} = \sqrt{I_a^2 + 2I_a I_1 \cos \varphi + I_1^2};$$

$$I_{2-} = \sqrt{(I_a - I_1 \cos \varphi)^2 + (I_1 \sin \varphi)^2} = \sqrt{I_a^2 - 2I_a I_1 \cos \varphi + I_1^2}.$$

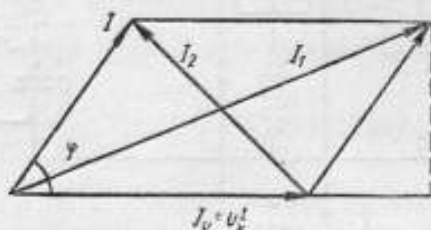


Рис. 8.

Равенство т. э. д. с. на переменном и постоянном токе возможно при равенстве токов в нагревателях при постоянном токе I_{1-} и I_{2-} и переменном токе I_1 и I_2 . Тогда, подставив полученные выражения в (26), получим

$$A_0 \frac{I_{1-}^2 - I_{2-}^2}{4} = A_0 P_{-} = A_0 UI \cos \varphi = A_0 P_{-}. \quad (27)$$

Полученный результат подтверждает, что измеренная мощность на постоянном токе равна мощности переменного тока. Результат этот получен без каких бы то ни было предположений о зависимости между током в нагревателе и т. э. д. с. термопреобразователя. Таким образом, метод раздельного определения т. э. д. с. обоих терморпар обеспечивает точное измерение мощности переменного тока независимо от вольтамперных характеристик термопреобразователей.

Метод этот сложнее в эксплуатации, так как т. э. д. с. e_{1-} и e_{2-} на постоянном токе могут принимать те же величины, что и на переменном токе при одном значении для тока и напряжения.

4. Результаты измерения мощности

Определение погрешностей измерения мощности термоэлектрическим методом можно произвести, применив термоэлектрический метод с калиброванной нагрузкой.

Схема соединения представлена на рис. 9, где термопары T_1 и T_2 термоэлектрического ваттметра ТВТ, играющего роль поверяемого, могут быть включены встречно, и измеряется разностная т. э. д. с. и может быть осуществлено включение, при котором измеряется т. э. д. с. каждого преобразователя в отдельности. Так как нужно задать некоторый сдвиг фаз между током и напряжением, то нагрузка не может создаваться чисто активным сопротивлением. Поэтому последовательно с сопротивлением R_n , характеристика которого на переменном токе известна, включен конденсатор C . Чтобы восстановить при переходе к постоянному току то же значение нагрузки, необходимо, замкнув

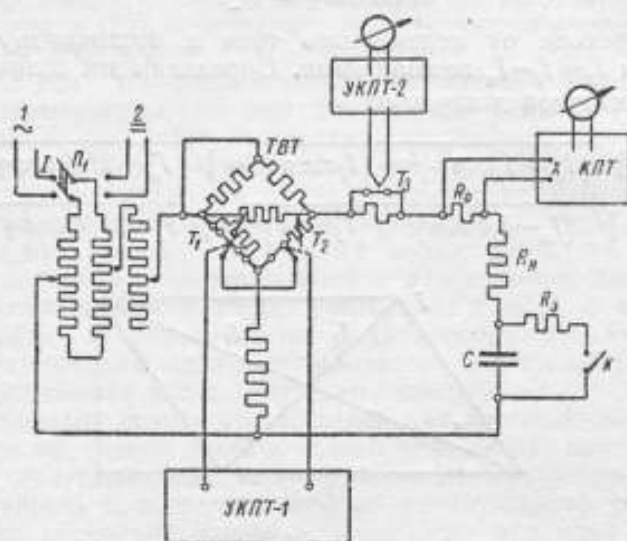


Рис. 9.

накоротко конденсатор, ввести сопротивление R_n , эквивалентное активному сопротивлению конденсатора, определяемому углом потерь.

Как видно из приведенной схемы, в термоваттметре нарушена симметрия относительно шунта. Результаты измерения не будут зависеть от потерь мощности в шунте, если при переходе с переменного тока к постоянному поддерживать неизменной величину тока.

Метод поверки заключается в следующем.

Как известно, мощность, измеряемая термоваттметром, будет:

$$P = I^2 r,$$

где I — ток, проходящий по нагрузке;

r — активное сопротивление всех элементов в последовательной цепи термоваттметра.

Если измерить на переменном токе точно величину тока I и знать характеристики всех сопротивлений, то можно с той же точностью определить измеряемую термоваттметром мощность. Перед нами стояла более простая задача — нужно было произвести относительные измерения, т. е. установить, изменяется ли показание термоваттметра в зависимости: 1) от способа измерения т. э. д. с. при неизменной мощности; 2) от изменения частоты.

При переключателе рода тока P_1 , находящемся в положении 1, устанавливают с помощью упрощенного компенсатора постоянного тока УКПТ-1 величину разностной т. э. д. с. термоваттметра, соответствующую некоторым значениям тока, напряжения и $\cos \varphi$.

При помощи упрощенного компенсатора УКПТ-2 фиксируют величину т. э. д. с. шунтированного вакуумного термопреобразователя T_2 , предназначенного для точного измерения величины переменного тока I .

Переключатель рода тока P_1 ставят в положение 2. При помощи регулировочного устройства изменяют величину мощности до тех пор, пока т. э. д. с. термопары T_2 не станет равной фиксированной на переменном токе, т. е. гальванометр будет возвращен на нуль.

С помощью упрощенного компенсатора отмечают изменение в разностной т. э. д. с. термоваттметра.

Измеряют величину постоянного тока, равного действующему значению переменного, при помощи компенсатора постоянного тока КПТ и образцовой катушки.

Повторяют весь цикл измерений, когда фиксируется т. э. д. с. каждого термопреобразователя отдельно.

Погрешность δ_1 при первом методе измерения будет определяться отношением разности величин разностной т. э. д. с. при переходе с переменного тока на постоянный к величине разностной т. э. д. с., полученной при первом измерении.

Погрешность δ_2 при втором методе измерения будет определяться отношением

$$\delta_2 = \frac{(e_{1\sim} - e_{2\sim}) - (e_{1-} - e_{2-})}{e_{1-} - e_{2-}},$$

где $e_{1\sim}$ и $e_{2\sim}$ — т. э. д. с. соответственно первого и второго термопреобразователей, измеренные на переменном токе; e_{1-} и e_{2-} — тоже, измеренные на постоянном токе.

Экспериментальные данные показывают, что измерения мощности при $\cos \varphi = 1$ в диапазоне частот от 50 до 10 000 гц не содержат дополнительной погрешности от частоты, и погрешность метода не превосходит $\pm 0,05\%$.

При $\cos \varphi = 0,5$ дополнительная погрешность составляет $\pm 0,1\%$ для всего диапазона частот.

При малых $\cos \varphi$ используется метод раздельного измерения т. э. д. с. обоих термопреобразователей и тогда погрешность также не превосходит $\pm 0,05\%$.

При помощи описанного термоэлектрического метода был исследован ряд ваттметров, как предназначенных, так и не предназначенных для измерения на переменном токе повышенной частоты. На основании этих исследований можно сказать, что частотная погрешность электродинамических ваттметров значительна и возрастает с повышением частоты. Таким образом, необходимо производить поверку ваттметров на переменном токе той частоты, при которой они будут применяться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Park J. N. and Lewis A. B., NBS Journ Res., 25 (1940), № 5.
2. Безикович А. Я., Электрические измерения, Труды ВНИИМ, вып. 14 (74), Машгиз, 1952, стр. 54—62.

ВАТТМЕТРОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОБРАЗЦАХ МАЛОЙ МАССЫ

В практике измерения потерь на гистерезис и вихревые токи в листовых электротехнических сталях широкое применение получил ваттметровый метод испытания образцов массой 10 кг. Образцы при этом изготавливаются в виде четырех пакетов из прямоугольных полос длиной 500 мм и шириной 30 мм, из которых составляется магнитная цепь в виде квадрата.

Такое количество материала, расходуемого на изготовление образцов, составляет при массовых испытаниях значительную величину.

Поэтому вопрос об уменьшении массы испытуемого образца является очень важным.

В ряде случаев, за исключением прямо-сдаточных испытаний согласно ГОСТ 802—41, возможно испытание образцов значительно меньшей массы. Для проведения подобного рода испытаний предлагается разработанная автором ваттметровая установка, позволяющая измерять потери на переменном токе промышленной частоты образцов листовой электротехнической стали массой 2 кг.

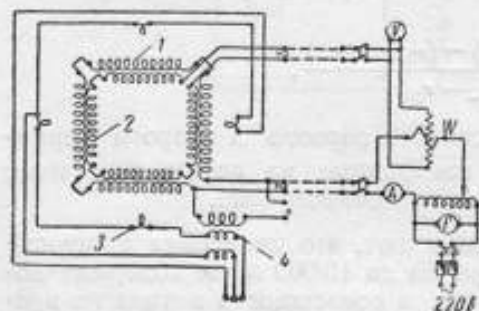


Рис. 1. Электрическая схема ваттметровой установки

Электрическая схема установки изображена на рис. 1.

Намагничивающий прибор этой установки выполнен по типу аппарата Доливо-Добровольского—Эпштейна.

Прибор содержит намагничивающую обмотку 1 из 300 витков медного провода ПЭБО диаметром 2,02 мм, измерительную обмотку 2 из 600 витков медного провода ПЭБО диаметром 1 мм и измерительную обмотку 3 из 4 витков многожильного эмалированного провода с шелковой оплеткой диаметром 0,5 мм. Обмотка 2 предназначена для измерения на переменном токе, обмотка 3— для измерений на постоянном токе, катушка 4— для компенсации магнитного потока в воздушном зазоре.

Все обмотки равными частями, соединенными последовательно, навиты на четыре катушки, расположенные по сторонам квадрата.

Каркасы катушек изготовлены из прессишпана. Внутреннее окно каркаса 35×17 мм², длина 200 мм.

Испытуемые образцы изготавливаются в виде четырех пакетов, собранных из полос длиной 250 мм и шириной 30 мм.

Пакеты вставляются в катушки встык друг к другу, образуя квадрат со средним периметром, равным 1000 мм.

Для обеспечения надежного магнитного контакта в стыках пакетов конструкцией предусмотрена система зажимов.

Общий вид намагничивающего прибора представлен на рис. 2.

При испытании образцов на переменном токе определяются потери на гистерезис и вихревые токи P_{hf} в зависимости от максимального значения магнитной индукции B_{max} . Подсчет этих величин производится по формулам:

$$B_{max} = \frac{E_2 \cdot 10^8}{4k_f f s w_2} \quad (1)$$

и

$$P_{hf} = \left(P_w \frac{w_1}{w_2} - \frac{U_2^2}{r_2'} \right) \left(1 + \frac{r_2}{r_2'} \right), \quad (2)$$

где E_2 — э. д. с. в измерительной обмотке в v ;

k_f — коэффициент формы кривой э. д. с.;

f — частота переменного тока в $гц$;

s — сечение образца в $см^2$;

w_2 — число витков измерительной обмотки;

P_w — показания ваттметра в $вт$;

w_1 — число витков намагничивающей обмотки;

U_2 — показание вольтметра в v ;

r_2' — сопротивление измерительной обмотки в $ом$;

r_2 — приведенное сопротивление вольтметра и параллельной обмотки ваттметра в $ом$.

Величина r_2' определяется по формуле

$$r_2' = \frac{r_v r_w}{r_v + r_w}, \quad (3)$$

где r_v — сопротивление вольтметра в $ом$;

r_w — сопротивление параллельной обмотки ваттметра в $ом$.

Значение э. д. с. E_2 вычисляется из показания вольтметра по формуле

$$E_2 = U_2 \left(1 + \frac{r_2}{r_2'} \right). \quad (4)$$

Поправочными членами $\frac{r_2}{r_2'}$ в ф-лах (2) и (4) можно пренебречь, если $r_2 \ll r_2'$.

Увеличение r_2' целесообразно также с целью уменьшения поправки на потери в приборах $\frac{U^2}{r_2}$.

В изготовленном нами намагничивающем приборе величина r_2 сведена к возможному минимуму и равна 1,6 $ом$.

Значение r_2' , как уже указывалось выше, определяется сопротивлением электроизмерительных приборов и равно 1100 — 1400 $ом$. При

таких значениях r_2 и r_2' поправочным членом $\frac{r_2'}{r_2}$ можно пренебречь, так как погрешность от этого не будет превышать 0,15%.

Основной трудностью при создании ваттметровой установки, обусловленной уменьшенной массой образца, являлось измерение малых величин мощности при малых коэффициентах мощности, доходящих до 0,05, и относительно небольших напряжениях, порядка 30—60 в.

В связи с этим потребовалось разработать специальный малокосинусный ваттметр (рис. 3).

В основу разработки положена электродинамическая система ваттметра с магнитным экраном.



Рис. 2. Намагничивающий прибор ваттметровой установки.

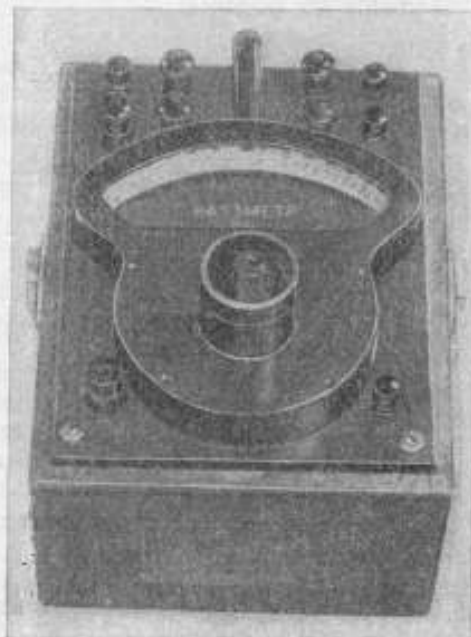


Рис. 3. Малокосинусный ваттметр.

В отличие от ранее существовавших ваттметров подвижная рамка укреплена на растяжках и применен световой указатель. Использование светового указателя позволило значительно облегчить подвижную часть, повысить чувствительность прибора и улучшить равномерность его шкалы.

Применение растяжек и светового отсчета позволило значительно снизить собственное потребление ваттметра и довести значение номинальной силы тока в параллельной цепи до 7,5 ма.

Достигнутое значение чувствительности прибора позволило увеличить общее сопротивление параллельной цепи на пределе 30 в до 4000 ом, 75 в до 10 000 ом и 150 в до 20 000 ом.

Повышение сопротивления в параллельной цепи в свою очередь облегчило осуществление фазовой компенсации, которая по расчетным данным на всех пределах не превышает нескольких секунд.

Прибор снабжен экраном, изготовленным из листов пермаллоя толщиной 0,35 мм, в виде пяти изолированных друг от друга цилиндров и соответствующих крышек из того же материала. Поверх пермаллового экрана надевается второй экран из листового железа толщиной 1 мм.

Успокоение прибора достигается воздушным крыльчатым успокоителем.

Основные данные прибора:

Номинальное значение силы тока	2,5—5 а
Номинальное напряжение	30—75—150 в
Номинальный cos φ	0,1
Сопротивление параллельной обмотки	4000—10 000—20 000 ом
Класс точности прибора	0,5
Число делений шкалы прибора	150
Вариации прибора	0,2%

Смещение нулевого положения светового указателя после работы при номинальной нагрузке в течение часа составляет 0,3 деления.

Наряду с измерением потерь на гистерезис и вихревые токи, желательно на тех же образцах определять основную кривую намагничивания.

В намагничивающем приборе предусмотрена возможность подключения его к баллистической установке.

Для определения основной кривой намагничивания на постоянном токе предусмотрена обмотка для измерения индукции, состоящая из четырех витков, навитых по одному витку в центральной части каждой катушки.

От каждых двух последовательно соединенных витков сделаны выводы к зажимам. Таким образом, в зависимости от чувствительности баллистического гальванометра, могут быть использованы два или четыре витка.

Для компенсации магнитного потока в воздушном зазоре между образцом и измерительной обмоткой, который может составить заметную величину при испытании образцов массой меньше 2 кг, предусмотрена компенсирующая катушка взаимной индуктивности 4 (рис. 1). Первичная обмотка этой катушки включается последовательно в намагничивающую цепь, а вторичная — навстречу и последовательно с измерительной обмоткой прибора.

Вследствие компенсации воздушного потока при измерениях определяется внутренняя магнитная индукция образца

$$B_i = B - \mu_0 H. \quad (5)$$

Напряженность намагничивающего поля измеряется посредством плоской измерительной катушки, накладываемой на образец.

Намагничивающая обмотка прибора позволяет получать постоянное магнитное поле напряженностью до 50 э.

Сравнительные испытания образцов листовых материалов на данной установке и на образцовой установке Магнитной лаборатории ВНИИМ показали, что расхождение результатов измерения потерь при индукции 10 000 и 15 000 гс не превышает 3%. В отношении кривой намагничивания эти расхождения лежат в пределах погрешностей баллистического метода измерения.

В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены результаты сравнительных испытаний одного образца электротехнической стали.

Для испытания на образцовой установке был взят нормальный десятикилограммовый образец. Затем полосы длиной 500 мм были разрезаны пополам и собраны образцы для измерений на данной установке.

Таблица 1

Потери на гистерезис и вихревые токи

Метод измерения	Потери при частоте 50 гц в вт/кг	
	Для $B_{\max} = 10\ 000$ гс	Для $B_{\max} = 15\ 000$ гс
Измерения на образцовой ваттметровой установке	1,18	2,83
Измерения на новой ваттметровой установке	1,21	2,79

Таблица 2

Основная кривая намагничивания

Напряженность магнитного поля в эрстедах	Магнитная индукция в гс	
	Измерения в нормальном переметре	Измерения на новой ваттметровой установке
10	13 460	13 360
20	14 380	14 300
30	14 960	14 880
40	15 350	15 300
50	15 640	15 630

Приводимый в статье малокоcosинусный ваттметр разработан автором в творческом содружестве с механиком ленинградского завода „Эталон“ Е. Т. Мурашевым.

О ПОПРАВКАХ К ПОКАЗАНИЯМ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ КОМПЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В современных пятидекадных компенсаторах постоянного тока¹ должны приниматься специальные меры для устранения зависимости рабочего тока от показаний декад. Это обстоятельство было одной из причин появления значительного числа разновидностей компенсаторов, имеющих различное построение схемы [1].

В принципе большинство схем дает более или менее равноценные решения задачи сохранения неизменности общего сопротивления цепи рабочего тока при одновременной пропорциональности между показаниями декад и действительными значениями напряжения. Однако, если рассматривать их с точки зрения правильного и полного выявления погрешностей, вызываемых отклонениями сопротивлений катушек от номинальных значений, схемы имеют особенности, до настоящего времени не освещавшиеся в литературе и не учитываемые при практической поверке. Вследствие этого действительные поправки могут довольно значительно отличаться от полученных при поверке.

В настоящей работе приведен анализ схем некоторых наиболее употребительных пятидекадных компенсаторов и даны формулы для действительных значений измеряемой э. д. с., позволяющие указать правильные приемы поверки для каждого типа компенсаторов.

1. Компенсатор типа ПВ-6 завода „Эталон“

Принципиальная схема этого прибора изображена на рис. 1. Характерным для этой схемы является последовательное соединение декад и наличие, кроме измерительных, трех замещающих декад, служащих для сохранения постоянным общего сопротивления прибора. Точная поверка компенсатора этого типа может производиться путем сравнения сопротивления его катушек с какой-либо одной катушкой, принятой за исходную, например с первой катушкой первой декады. Общая методика такой поверки (в применении к шестидекадному компенсатору, схема которого не имеет принципиальных отличий от рассматриваемой) описана в более ранней статье автора [2]. С точки зрения требуемых вычислений несколько более проста, хотя и уступает по точности, поверка методом сравнения отдельных катушек компенсатора с равными им по номинальным значениям образцовыми

¹ Приборы, основанные на принципе компенсации напряжений, в прежних работах по электрическим измерениям назывались потенциометрами. В последние годы этот термин начинает вытесняться более правильным названием „электроизмерительный компенсатор“ или просто „компенсатор“, которого мы и будем придерживаться в настоящей работе.

катушками сопротивления первого класса. С еще меньшей затратой времени, но и с меньшей точностью, может производиться поверка методом непосредственного сличения с образцовым компенсатором. При всех способах в результате поверки получают таблицы действитель-

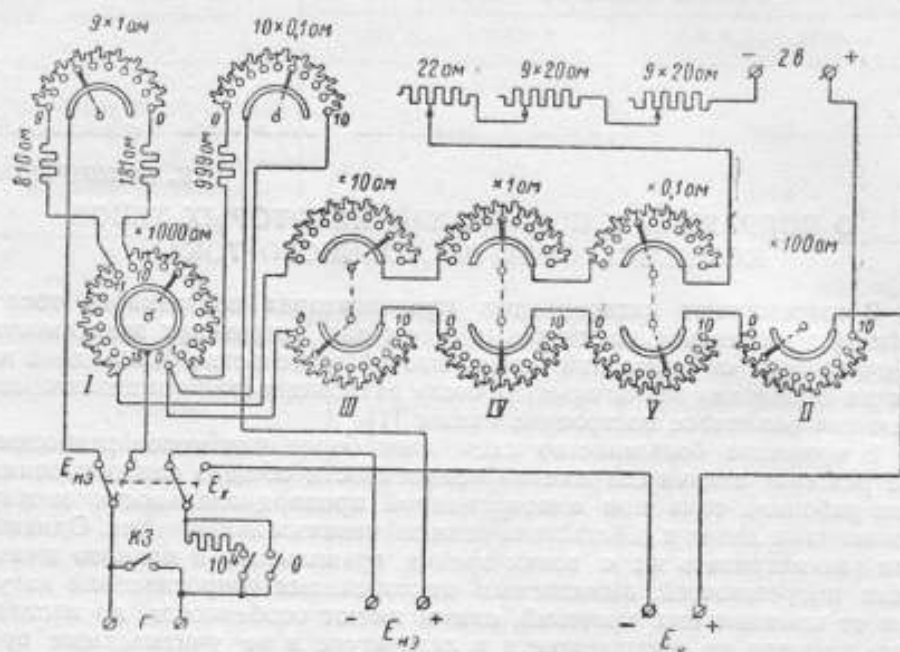


Рис. 1. Принципиальная схема компенсатора типа ПВ-6.

ных значений компенсационного напряжения, создаваемого при всех показаниях каждой декады. Эти таблицы позволяют подсчитывать действительные значения напряжения по формуле

$$E_x = \sum_{i=1}^{x_1} u_{1,i} + \sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} + \sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} + \sum_{i=1}^{x_4} u_{4,i} + \sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i} + u_0$$

где

E_x — действительное значение скомпенсированного напряжения;

x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 — отсчеты по лимбам декад от первой до пятой; $u_{1,i}, u_{2,i}$ и т. д. — падения напряжения на отдельных катушках с порядковым номером i , входящих в первую, вторую и т. д. декаду;

u_0 — падение напряжения в измерительной цепи компенсатора при общем показании, равном нулю, т. е. напряжение при нулевом показании.

Это выражение может быть представлено в более коротком виде

$$E_x = \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^{x_k} u_{k,i} + u_0 \quad (1)$$

где двойная сумма заменяет первые пять членов предыдущего выражения. Значение напряжения при нулевом показании можно включить

в действительные значения напряжения для последней декады, тогда в ф-ле (1) останется только двойная сумма.

В выражении (1), во избежание его усложнения, опущен множитель, учитывающий погрешность так называемой температурной декады установочного сопротивления, которая может быть не равна нулю, если показание температурной декады при практическом применении компенсатора иное, чем при поверке. Однако, как правило, эта погрешность настолько мала, что ее можно не учитывать. Таким образом, для нахождения действительного значения измеряемого напряжения достаточно просуммировать данные из таблицы поверки для декад, образующих общее показание компенсатора.

2. Компенсаторы типа ПВ-1 и ПВ-2 завода „Эталон“

Эти приборы имеют значительное распространение, и поэтому выяснение вопроса о правильном использовании результатов поверки для

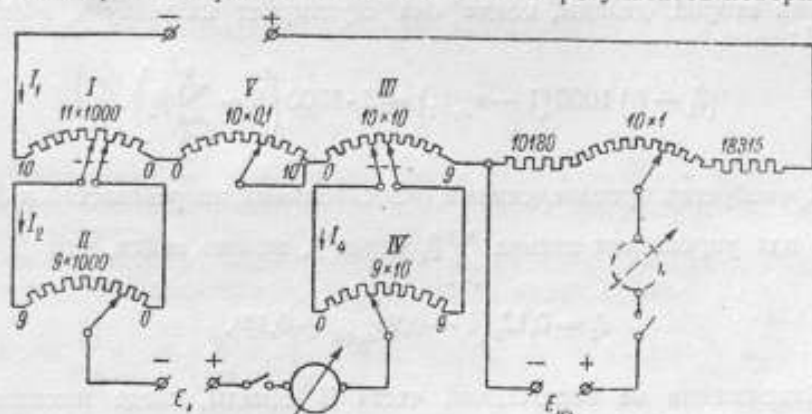


Рис. 2. Принципиальная схема компенсатора типа ПВ-1.

введения поправок представляет практический интерес. Принципиальная схема компенсатора типа ПВ-1 изображена на рис. 2. Она общеизвестна, поэтому мы не будем повторять ее описание. Обратим внимание лишь на то, что для нахождения значения измеряемой э. д. с. недостаточно брать простую сумму найденных при поверке действительных значений напряжения для отдельных декад. Поверка каждой декады производится при нулевых показаниях остальных декад. Для шунтирующих декад это означает, что погрешности, например II декады, определяются при включении ее сопротивления параллельно первой катушке I декады. При работе же на компенсаторе показания последней могут измениться, а с ними будут изменяться и погрешности шунтирующей декады. В точной формуле для измеряемой э. д. с. это должно быть учтено.

Точная формула для э. д. с. может быть получена следующим образом. Введем обозначения:

- x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 — отсчеты (число включенных катушек) декад от I до V соответственно;
- α_1 — относительная погрешность первой катушки I декады;
- α_{x_i+1} — то же катушки с порядковым номером $x_i + 1$;

β_i — погрешность i -й катушки II декады;
 I_1, I_2 — токи в I и II декадах;
 $u_{1,i}, u_{2,i}, \dots, u_{5,i}$ — напряжения на отдельных катушках с порядковым номером i , входящих в состав первой, второй, ..., пятой декад;

$\sum_{i=1}^{x_1} u_{1,i}, \sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i}, \dots, \sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i}$ — напряжения на включенных частях I, II, ..., V декад;

$\sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^{x_k} u_{k,i}$ — сумма напряжений на включенных частях всех пяти декад, определенных при нулевых показаниях остальных декад;

u_0 — напряжение при нулевом показании компенсатора.

Применяя эти обозначения, можно написать для напряжения между щетками второй декады, когда она шунтирует катушку с номером $X_1 + 1$:

$$(I_1 - I_2) 1000 (1 - \alpha_{x_1+1}) = I_2 \cdot 1000 \left(9 - \sum_{i=1}^9 \beta_i \right).$$

Пренебрегая произведениями относительных погрешностей и обозначая для упрощения письма $\sum_{i=1}^9 \beta_i$ через β , можно найти, что

$$I_2 = 0,1 I_1 (1 - 0,9 \alpha_{x_1+1} + 0,1 \beta).$$

Напряжение на включенной части II декады, когда показание I декады не равно нулю

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} \right)_{x_1 \neq 0} &= I_2' 1000 \left(x_2 - \sum_{i=1}^{x_2} \beta_i \right) = \\ &= 100 I_1 \left(x_2 - \sum_{i=1}^{x_2} \beta_i - 0,9 x_1 \alpha_{x_1+1} + 0,1 x_2 \beta \right). \end{aligned}$$

Если же щетки первой декады поставить в нулевое положение, то это напряжение станет равным

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} \right)_{x_1=0} &= I_2' 1000 \left(x_2 - \sum_{i=1}^{x_2} \beta_i \right) = \\ &= 100 I_1 \left(x_2 - \sum_{i=1}^{x_2} \beta_i - 0,9 x_2 \alpha_1 + 0,1 x_2 \beta \right). \end{aligned}$$

Разность этих напряжений будет равна:

$$\left(\sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} \right)_{x_1 \neq 0} - \left(\sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} \right)_{x_1=0} = 100 I_1 \cdot 0,9 x_2 (\alpha_1 - \alpha_{x_1+1}).$$

Полученное выражение можно представить в более простом виде, приняв во внимание, что напряжение на первой катушке I декады

$$u_{1,1} = 1000I_1(1 - \alpha_1),$$

и напряжение на катушке с порядковым номером $(x_1 + 1)$

$$u_{1,x_1+1} = 1000I_1(1 - \alpha_{x_1+1}).$$

Тогда

$$u_{1,x_1+1} - u_{1,1} = 1000I_1(\alpha_1 - \alpha_{x_1+1}).$$

Найдя отсюда $(\alpha_1 - \alpha_{x_1+1})$ и подставив в ранее найденное выражение, получим окончательно

$$\left(\sum_{i=1}^{x_1} u_{2,i} \right)_{x_1+0} = \left(\sum_{i=1}^{x_1} u_{2,i} \right)_{x_1=0} + 0,09(u_{1,x_1+1} - u_{1,1})x_2.$$

Совершенно аналогично можно найти подобное выражение для напряжения на включенной части IV декады:

$$\left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{4,i} \right)_{x_3+0} = \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{4,i} \right)_{x_3=0} + 0,09(u_{3,x_3+1} - u_{3,1})x_4.$$

Напряжение на включенной части трех остальных декад будет, очевидно, зависеть только от их собственных погрешностей, так как по ним проходит общий рабочий ток I_1 .

Таким образом, общее напряжение на всех декадах при данном показании компенсатора x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 будет равно

$$E_x = \sum_{i=1}^{x_1} u_{1,i} + \left(\sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} \right)_{x_2=0} + 0,09x_2(u_{1,x_1+1} - u_{1,1}) + \sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} + \\ + \left(\sum_{i=1}^{x_4} u_{4,i} \right)_{x_4=0} + 0,09x_4(u_{3,x_3+1} - u_{3,1}) + \sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i} + u_0.$$

или

$$E_x = \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^{x_k} u_{k,i} + 0,09 [x_2(u_{1,x_1+1} - u_{1,1}) + x_4(u_{3,x_3+1} - u_{3,1})] + u_0. \quad (2)$$

Как видно из этого выражения, действительное значение напряжения на включенной части сопротивления компенсатора равно сумме напряжений на каждой из декад, определенных при проверке, когда переключатели всех остальных декад установлены в нулевые положения, плюс некоторый поправочный член, зависящий от того, насколько напряжения на катушках I и III декад, шунтированных при данном положении переключателей, отличаются от напряжений на первых катушках этих декад, а также от отсчетов по лимбам II и IV декад.

Напряжение при нулевом показании u_0 может быть прибавлено к напряжению на включенной части V декады и тогда, войдя в двойную сумму, может отдельно не учитываться.

Найденное выражение позволяет сделать следующие выводы: во-первых, для нахождения правильного результата измерения недостаточно просуммировать табличные данные, полученные при проверке каждой из декад, которая обычно производится при нулевых положениях других переключателей; во-вторых, для введения поправок ко

всем показаниям компенсатора, включая и наибольшие показания I и III декад, необходимо знать действительные значения напряжения на последних катушках этих декад, т. е. $u_{1,11}$ и $u_{3,10}$, которые из данных обычной поверки не могут быть определены.

Сообразно с этим, правильная и полная поверка компенсаторов типа ПВ-1 должна производиться с определением напряжения на всех одиннадцати (а для приборов типа ПВ-2—двадцати одной) катушках I и на всех десяти катушках III декады, для чего при поверке крайних точек необходимо ближние к нулевым положениям щетки переключателей этих декад изолировать от контактов. При поверке этих точек требуется заново отрегулировать рабочий ток компенсатора, так как он изменится благодаря отключению шунтирующей декады и из-за связанного с этим некоторого увеличения общего сопротивления цепи рабочего тока.

Схема компенсатора типа ПВ-2 отличается от схемы на рис. 1 лишь тем, что число катушек в I декаде равно не 11, а 21, и последняя V декада выполнена двойной, что в данном случае несущественно. Поэтому ф-ла (2) относится к обоим типам без всяких изменений.

Интересно оценить, какая наибольшая погрешность может иметь место, если не учитывать поправочный член ф-лы (2), как это обычно и бывает. Эта оценка даст своего рода характеристику рассматриваемой схемы.

При поверке компенсатор признается годным, если его погрешности не превосходят допустимых по действующей в настоящее время «Инструкции для поверки потенциометров постоянного тока (№ 68—44)». По этой инструкции для компенсаторов постоянного тока первого класса допустимая погрешность вычисляется по формуле

$$(150u + 2u_n) 10^{-6} \text{ в},$$

где u — значение измеряемого напряжения;

u_n — наибольшее напряжение, измеряемое прибором, выраженное в в.

Чтобы судить о наибольшем значении поправочного члена, которое он может иметь в случае прибора типа ПВ-2, удовлетворяющего требованиям инструкции, рассмотрим сначала первую его часть

$$0,09x_2(u_{1,x_1+1} - u_{1,1}).$$

Первый член выражения в скобках равен разности $\sum_{i=1}^{x_1+1} u_{1,i} - \sum_{i=1}^{x_1} u_{1,i}$. Если компенсатор удовлетворяет требованиям инструкции, этот член может иметь наибольшее значение

$$0,1(x_1 + 1) + [150 \cdot 0,1(x_1 + 1) + 2,2] \cdot 10^{-6} - \\ - [0,1x_1 - (150 \cdot 0,1x_1 + 2,2) \cdot 10^{-6}] = 0,1 + [15(2x_1 + 1) + 4,4] \cdot 10^{-6} \text{ в}.$$

Второй член выражения в скобках может достигнуть значения (с погрешностью противоположного знака)

$$u_{1,1} = 0,1 - (15 + 2,2) \cdot 10^{-6} \text{ в}.$$

Следовательно, выражение в скобках может получить значение

$$u_{1,x_1+1} - u_{1,1} = [30(x_1 + 1) + 6,6] \cdot 10^{-6} \text{ в},$$

а вся первая часть поправочного члена, зависящая от погрешностей катушек I декады, может достигнуть значения

$$0,09x_2(u_{1,x_1+1} - u_{1,1}) = 0,09x_2(30x_1 + 36,6) \cdot 10^{-6} \text{ в}.$$

Допустимая погрешность прибора, если показание его определяется только I декадой ($u = 0,1x_1$), может быть написана в виде

$$(150 \cdot 0,1x_1 + 2u_n) \cdot 10^{-6} = (15x_1 + 2,2) \cdot 10^{-6} \text{ в}.$$

Сопоставление этого выражения с выражением для наибольшего значения первой части поправочного члена приводит к заключению, что она при достаточно больших значениях x_2 (5 и более) может превысить допустимую погрешность. Следовательно, компенсатор, который по инструкции № 68—44 должен быть признан годным, в действительности может иметь невыявленные погрешности, причем только эти погрешности могут превышать весь допуск.

Точно так же, вторая часть поправочного члена может достигнуть существенной величины по отношению к допустимой погрешности, если показания I и II декад равны нулю. Вторая часть, однако, по абсолютной величине значительно меньше первой и соответственно меньше влияет на общую погрешность компенсатора, если отсчет производится по всем пяти декадам.

Приведенный подсчет показывает, что пренебрегать дополнительным членом выражения (2), как это делалось и делается до настоящего времени, можно только при малых разностях между сопротивлениями катушек внутри I декады (это, хотя и в меньшей степени, относится и к III декаде), т. е. в случае особенно тщательно изготовленных экземпляров компенсаторов. Вообще же ими пренебрегать нельзя, следовательно, проверка простым сличением с образцовым компенсатором при всех показаниях каждой декады недостаточна для полного выявления погрешностей. Рассмотрение схемы показывает, кроме того, что сложность введения поправок делает ее неудобной для точных измерений.

3. Компенсаторы типа ПН-1 и ПН-2 завода „Эталон“

Принципиальная схема этих компенсаторов одна и та же. Она изображена на рис. 3. Приборы имеют два предела измерений: 2,1 и 0,21 в, рабочий ток равен 0,01 а. Как видно из схемы, III декада выполнена в виде шунтирующей одну из катушек второй, а IV и V декады, соединенные последовательно, шунтируют одну из катушек I декады. Ток в III декаде составляет одну сотую долю, ток в последних двух декадах — одну тысячную долю тока в основных декадах. Эти соотношения позволяют осуществить все декады из катушек в 10 и 1 ом. Из схемы видно, что ток, ответвляющийся в III декаду, зависит от значений сопротивления катушек II декады, так же как ток IV и V декад — от сопротивления шунтируемых катушек I декады. Поэтому в выражение для измеряемой электродвижущей силы должны войти дополнительные поправочные члены, вид которых и оценка влияния приведены ниже.

Падения напряжения на включенных участках I и II декад, соединенных последовательно, зависят, очевидно, только от силы тока в

них и от действительных значений их сопротивлений. Сохраняя введенные ранее обозначения, можно написать

$$\sum_{i=1}^{x_1} u_{1,i} + \sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} = I_3 \left[10 \left(x_1 - \sum_{i=1}^{x_1} \alpha_i \right) + 1 \left(x_2 - \sum_{i=1}^{x_2} \beta_i \right) \right].$$

Падение напряжения на включенном участке III декады, когда переключатель II декады находится в нулевом положении, как это бывает при проверке непосредственным сличением с образцовым компенсатором, равно

$$\left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2=0} = 10 \left(x_3 - \sum_{i=1}^{x_3} \gamma_i \right) I_3.$$

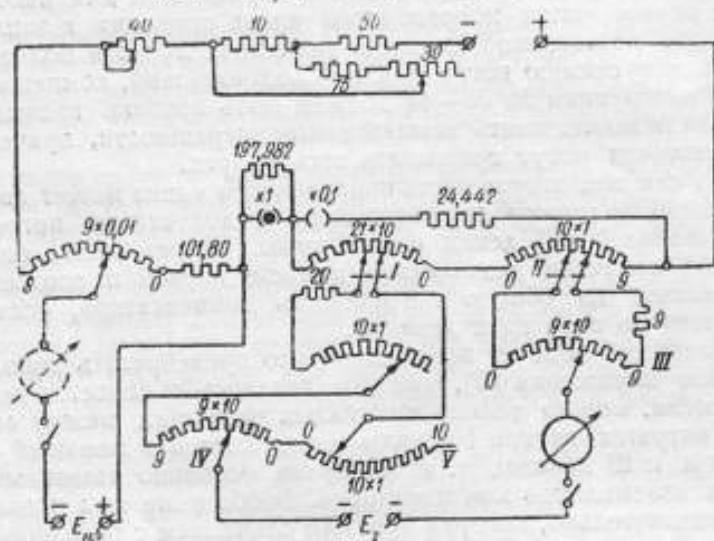


Рис. 3. Принципиальная схема компенсаторов типа ПН-1 и ПН-2.

При пользовании компенсатором x_2 может принять иное значение, и ток I_3 вследствие неравенства катушек II декады становится равным I'_3 . Следовательно,

$$\left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2 \neq 0} = 10 \left(x_3 - \sum_{i=1}^{x_3} \gamma_i \right) I'_3.$$

Вследствие этого в выражении для E_x появляется поправочный член

$$\left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2 \neq 0} - \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2=0} = 10 \left(x_3 - \sum_{i=1}^{x_3} \gamma_i \right) (I'_3 - I_3).$$

Определим разность токов $(I'_3 - I_3)$. Обозначив относительную погрешность суммарного сопротивления III декады вместе с добавочным сопротивлением 9 ом через C , можно записать значение этого сопротивления в виде $99(1-C)$. Тогда

$$I'_3 = I_3 \frac{1 - \beta_{x_2+1}}{1 - \beta_{x_2+1} + 99(1-C)} \cong 0,01 I_3 (1 - 0,99 \beta_{x_2+1} + C).$$

Аналогично

$$I_3 = 0,01I_2(1 - 0,99\beta_1 + C),$$

откуда разность токов

$$I'_3 - I_3 = 0,01I_2 \cdot 0,99(\beta_1 - \beta_{x_2+1}).$$

Разность погрешностей $(\beta_1 - \beta_{x_2+1})$ можно выразить через разность напряжений на соответствующих катушках II декады, так как

$$u_{2,x_2+1} = I_2 \cdot 1 \cdot (1 - \beta_{x_2+1}), \quad u_{2,1} = I_2 \cdot 1 \cdot (1 - \beta_1)$$

и их разность

$$u_{2,x_2+1} - u_{2,1} = I_2(\beta_1 - \beta_{x_2+1}),$$

откуда

$$\beta_1 - \beta_{x_2+1} = \frac{u_{2,x_2+1} - u_{2,1}}{I_2}.$$

Приняв это во внимание, можно окончательно написать

$$\left(\sum_{l=1}^{x_2} u_{3,l} \right)_{x_2+0} = \left(\sum_{l=1}^{x_2} u_{3,l} \right)_{x_2=0} + 0,099(u_{2,x_2+1} - u_{2,1}).$$

Здесь u_{2,x_2+1} и $u_{2,1}$ — напряжения на $(x+1)$ -й и первой катушках II декады.

По тому же принципу, хотя и несколько сложнее, может быть составлено выражение для падения напряжения на включенных катушках IV и V декад при любом положении переключателя I декады, которое составляется из падения напряжения на этих катушках при нулевом положении переключателя I декады и поправочного члена:

$$\left(\sum_{l=1}^{x_4} u_{4,l} + \sum_{l=1}^{x_5} u_{5,l} \right)_{x_4+0} = \left(\sum_{l=1}^{x_4} u_{4,l} + \sum_{l=1}^{x_5} u_{5,l} \right)_{x_4=0} + 0,0000999(10x_4 + x_5)(u_{1,x_4+1} - u_{1,1}).$$

Полученные выше выражения для падения напряжения на включенных участках всех декад, с добавлением напряжения при нулевых их положениях, дают в сумме полное значение измеряемой электродвижущей силы:

$$E_x = \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^{x_k} u_{k,l} + 0,1x_3(u_{2,x_2+1} - u_{2,1}) + 0,0001(10x_4 + x_5)(u_{1,x_4+1} - u_{1,1}) + u_0. \quad (3)$$

Оценка наибольшей возможной погрешности, при которой компенсатор еще удовлетворяет требованиям инструкции № 68—44, произведенная подобно тому, как это сделано в случае компенсатора предыдущего типа, показывает, что значение первого поправочного члена при показании 0,099 β может достигать значения $36 \cdot 10^{-6} \beta$, т. е. около четырех единиц последней декады. В процентном отношении эта поправка составила бы 0,036% от показания компенсатора, и ею едва ли можно было бы пренебречь при точных измерениях.

Второй поправочный член при наименьшем абсолютном значении показания I декады, при котором происходит замена шунтированной катушки, т. е. при $x_1 = 1$, может достигнуть значения 0,76 микровольта, величины, которая едва ли может повлиять на результат измерения. Формула (3) и подсчеты возможных значений поправочных членов даны для основного предела измерений компенсатора (2,1 в). При множителе 0,1 значение в. д. с. должно быть умножено на действительное значение множителя.

4. „Лестничный“ компенсатор

Принципиальная схема этого прибора приведена на рис. 4. Каждая из декад, включенных „лестницей“, шунтирует две катушки предыдущей декады. Десятичное соотношение между падением напряжения

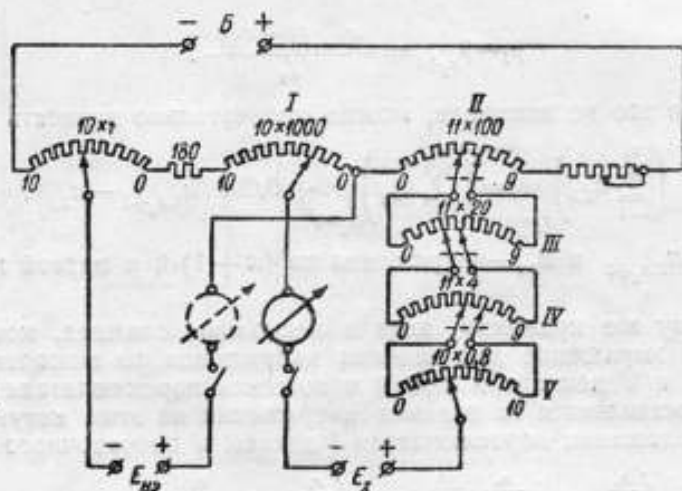


Рис. 4. Принципиальная схема „лестничного“ компенсатора.

на катушках этих декад достигается тем, что при переходе от декады к декаде сопротивление катушек уменьшается в пять раз, а сила тока — в два раза. Очевидно, что в этой схеме также должна иметь место взаимозависимость между погрешностями напряжений на отдельных декадах. Действительно, погрешности, например, V декады будут изменяться при передвижении переключателей IV, III и II декад. Поэтому взаимозависимость погрешностей носит еще более сложный характер, чем в предыдущих случаях. Формула для действительного значения E_x может быть выведена аналогичным предыдущему способом. Данные проверки сличением с образцовым прибором, полученные для отдельных декад при нулевых показаниях остальных декад, дают значение E_x :

$$E_x = \sum_{i=1}^{x_1} u_{1,i} + \sum_{i=1}^{x_2} u_{2,i} + \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2=0} + \left(\sum_{i=1}^{x_4} u_{4,i} \right)_{x_3=x_2=0} + \left(\sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i} \right)_{x_4=x_3=x_2=0} + u_0.$$

Нашей задачей является найти поправочные члены, обусловленные неравенством нулю x_2, x_3, x_4 . Найдем сначала общие выражения для сил тока I_2, I_4 и I_5 :

$$I_2 = I_2 \frac{100(2 - \beta_{x_2+1+2})}{100(2 - \beta_{x_2+1+2} + 20)(10 - \gamma)} \cong \frac{1}{2} I_2 \left(1 - \frac{1}{4} \beta_{x_2+1+2} + \frac{1}{20} \gamma \right).$$

Здесь приняты обозначения:

$$\beta_{x_2+1+2} = \beta_{x_2+1} + \beta_{x_2+2} \text{ и } \gamma = \sum_{i=1}^{10} \gamma_i.$$

Аналогичные сокращения приняты и в дальнейших формулах:

$$\begin{aligned} I_4 &\cong \frac{1}{2} I_2 \left(1 - \frac{1}{4} \gamma_{x_3+1+2} + \frac{1}{20} \delta \right) = \\ &= \frac{1}{4} I_2 \left(1 - \frac{1}{4} \beta_{x_2+1+2} - \frac{1}{4} \gamma_{x_2+1+2} + \frac{1}{20} \gamma + \frac{1}{20} \delta \right), \\ I_5 &\cong \frac{1}{2} I_4 \left(1 - \frac{1}{4} \delta_{x_4+1+2} + \frac{1}{20} \varepsilon \right) = \\ &= \frac{1}{8} I_2 \left[1 - \frac{1}{4} \beta_{x_2+1+2} - \frac{1}{4} \gamma_{x_2+1+2} - \frac{1}{4} \delta_{x_4+1+2} + \frac{1}{20} (\gamma + \delta + \varepsilon) \right]. \end{aligned}$$

В случае, когда показания предыдущих декад равны нулю, в этих выражениях погрешности $\beta_{x_i+1+2}, \gamma_{x_i+1+2}$ и δ_{x_i+1+2} заменяются погрешностями первых двух катушек $\beta_{1+2}, \gamma_{1+2}$ и δ_{1+2} :

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2 \neq 0} &= 20 I_3 \left(x_3 - \sum_{i=1}^{x_3} \gamma_i \right) \cong \\ &\cong \frac{1}{2} I_2 \cdot 20 \left(x_3 - \sum_{i=1}^{x_3} \gamma_i \right) \left(1 - \frac{1}{4} \beta_{x_2+1+2} + \frac{1}{20} \gamma \right), \\ \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2=0} &\cong \frac{1}{2} I_2 \cdot 20 \left(x_3 + \sum_{i=1}^{x_3} \gamma_i \right) \left(1 - \frac{1}{4} \beta_{1+2} + \frac{1}{20} \gamma \right), \\ \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2 \neq 0} &= \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_2=0} + 10 I_2 \frac{1}{4} x_3 (\beta_{1+2} - \beta_{x_2+1+2}). \end{aligned}$$

Для IV декады

$$\left(\sum_{i=1}^{x_4} u_{4,i} \right)_{x_2, x_3 \neq 0} = \left(\sum_{i=1}^{x_4} u_{4,i} \right)_{x_3 - x_2 = 0} + \frac{1}{4} I_2 x_4 (\beta_{1+2} - \beta_{x_2+1+2} + \gamma_{1+2} - \gamma_{x_2+1+2}).$$

Для V декады

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i} \right)_{x_4, x_3, x_2 \neq 0} &= \left(\sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i} \right)_{x_4 - x_3 - x_2 = 0} + \\ &+ \frac{1}{40} I_2 x_5 (\beta_{1+2} - \beta_{x_2+1+2} + \gamma_{1+2} - \gamma_{x_3+1+2} + \delta_{1+2} - \delta_{x_4+1+2}). \end{aligned}$$

Принимая во внимание, что

$$\beta_{1+2} - \beta_{x_2+1+2} = \frac{u_{2,x_2+1+2} - u_{2,1+2}}{100I_2},$$

$$\gamma_{1+2} - \gamma_{x_3+1+2} = \frac{u_{3,x_3+1+2} - u_{3,1+2}}{10I_2}$$

и

$$\delta_{1+2} - \delta_{x_4+1+2} = \frac{u_{4,x_4+1+2} - u_{4,1+2}}{I_2},$$

приходим к выражениям

$$\begin{aligned} \left(\sum_{l=1}^{x_2} u_{3,l} \right)_{x_2+0} &= \left(\sum_{l=1}^{x_2} u_{3,l} \right)_{x_2-0} + \frac{1}{40} x_2 (u_{2,x_2+1+2} - u_{2,1+2}); \\ \left(\sum_{l=1}^{x_3} u_{4,l} \right)_{x_3,x_2+0} &= \left(\sum_{l=1}^{x_3} u_{4,l} \right)_{x_3-x_2-0} + \\ &+ \frac{1}{40} x_4 \left(\frac{u_{2,x_2+1+2} - u_{2,1+2}}{10} + \frac{u_{3,x_3+1+2} - u_{3,1+2}}{1} \right); \\ \left(\sum_{l=1}^{x_4} u_{5,l} \right)_{x_4,x_3,x_2+0} &= \left(\sum_{l=1}^{x_4} u_{5,l} \right)_{x_4-x_3-x_2-0} + \\ &+ \frac{1}{40} x_5 \left(\frac{u_{2,x_2+1+2} - u_{2,1+2}}{100} + \frac{u_{3,x_3+1+2} - u_{3,1+2}}{10} + \frac{u_{4,x_4+1+2} - u_{4,1+2}}{1} \right). \end{aligned}$$

Сумма всех поправочных членов может быть написана в виде

$$\begin{aligned} &\frac{1}{40} [(x_2 + 0,1x_4 + 0,01x_5) (u_{2,x_2+1+2} - u_{2,1+2}) + \\ &+ (x_4 + 0,1x_5) (u_{3,x_3+1+2} - u_{3,1+2}) + x_5 (u_{4,x_4+1+2} - u_{4,1+2})], \end{aligned}$$

и полное выражение для э. д. с. E_x будет иметь вид

$$\begin{aligned} E_x &= \sum_{x=1}^5 \sum_{l=1}^{x_k} u_{k,l} + \frac{1}{40} [(x_2 + 0,1x_4 + 0,01x_5) (u_{2,x_2+1+2} - u_{2,1+2}) + \\ &+ (x_4 + 0,1x_5) (u_{3,x_3+1+2} - u_{3,1+2}) + x_5 (u_{4,x_4+1+2} - u_{4,1+2})] + u_0. \quad (4) \end{aligned}$$

Поправочный член в этом выражении имеет сложный вид, однако его рассмотрение показывает, что при значениях измеряемой э. д. с. не меньших 0,01 в, наибольшую долю составляет первая часть выражения в квадратных скобках; при показаниях от 0,01 до 0,001 в первая часть превращается в нуль и становится ощутимой вторая часть.

Как показывают расчеты, наибольшее значение ошибки из-за пренебрежения поправочным членом в этой схеме не столь велико, как в компенсаторах типа ПВ-1 или ПВ-2, так как в поправочный член входят разности напряжений на катушках не I, а II и следующих декад, а эти разности по абсолютному значению не велики, поскольку и сами напряжения на этих декадах малы. Поэтому данную схему следует рассматривать как несколько более удачную, но все же сильно уступающую схеме с замещающими декадами.

5. „Каскадный“ компенсатор

Отличительной особенностью схемы этого прибора является включение III декады параллельно одной из катушек I, IV—параллельно одной из катушек II и V—параллельно одной из катушек III декады (см. принципиальную схему, изображенную на рис. 5).

Рабочий ток в измерительном сопротивлении компенсатора может иметь два значения: 1 и 10 ма; в соответствии с этим имеется два верхних предела измерения: 0,11 и 1,1 в.

Общий ток прибора в обоих случаях равен 11 ма. Каждая из шунтирующих декад обтекается током, который в 10 раз меньше тока основной декады, и составлена из катушек, имеющих в 10 раз меньшее

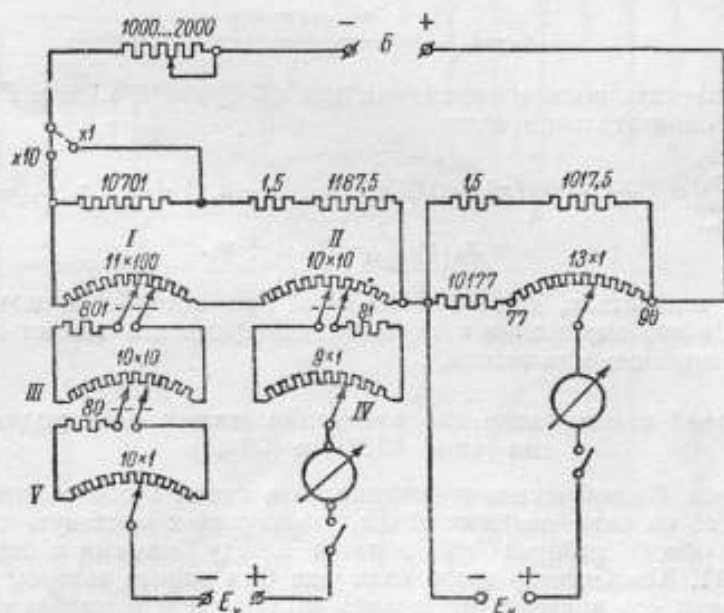


Рис. 5. Принципиальная схема „каскадного“ компенсатора.

сопротивление, поэтому падение напряжения на ее катушках n^2 два порядка меньше, чем на катушках соответствующей шунтируемой декады.

Опуская промежуточные выкладки, можно написать следующие выражения для сил тока в декадах с учетом погрешностей сопротивлений:

$$I_3 = 0,1I_1(1 - 0,9\alpha_{x_1+1} + 0,9\gamma);$$

$$I_4 = 0,1I_1(1 - 0,9\beta_{x_2+1} + 0,9\delta);$$

$$I_5 = 0,01I_1(1 - 0,9\alpha_{x_1+1} - 0,9\gamma_{x_2+1} + 0,9\gamma + 0,9\varepsilon),$$

где γ , δ и ε без индексов означают суммы погрешностей всех катушек III, IV и V декад соответственно.

Подставляя эти выражения (с учетом изменения номеров шунтируемых катушек) в формулы для падения напряжения

$$\left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_1=0} = \left(\sum_{i=1}^{x_3} u_{3,i} \right)_{x_1=0} + 10x_3(I'_3 - I_3);$$

$$\left(\sum_{i=1}^{x_4} u_{4,i}\right)_{x_2=0} = \left(\sum_{i=1}^{x_4} u_{4,i}\right)_{x_2=0} + x_4(I'_4 - I_4);$$

$$\left(\sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i}\right)_{x_1, x_2=0} = \left(\sum_{i=1}^{x_5} u_{5,i}\right)_{x_1-x_2=0} + x_5(I'_5 - I_5),$$

и приняв во внимание, что

$$\alpha_1 - \alpha_{x_1+1} = \frac{u_{1,x_1+1} - u_{1,1}}{100I_1}; \quad \beta_1 - \beta_{x_2+1} = \frac{u_{2,x_2+1} - u_{2,1}}{10I_1};$$

$$\gamma_1 - \gamma_{x_3+1} = \frac{u_{3,x_3+1} - u_{3,1}}{I_1},$$

можно получить полное выражение для измеряемой э. д. с. E_x в следующем окончательном виде:

$$E_x = \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^{x_k} u_{k,i} + 0,009 \left[(x_5 + 0,01x_5)(u_{1,x_1+1} - u_{1,1}) + x_4(u_{3,x_3+1} - u_{2,1}) + x_5(u_{3,x_3+1} - u_{3,1}) \right] + u_0. \quad (5)$$

При множителе, отличном от того, при котором производилась поверка, в это выражение в качестве коэффициента войдет действительное значение множителя.

6. Мостовой компенсатор для измерения малых электродвижущих сил (типы ППТН и КЛ-48)

На рис. 6 изображена принципиальная схема этого компенсатора, состоящего из пяти двойных декад, образующих мостовую схему, в которой общий рабочий ток делится между ветвями в отношении 10/11 : 1/11. Компенсатор этого вида уже был описан автором в связи с методикой его поверки [3], причем была выведена полная формула для измеряемой электродвижущей силы. Поэтому можно привести здесь лишь окончательную формулу, придав ей вид, соответствующий по форме и обозначениям принятому в настоящей статье:

$$E_x = F \left\{ \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^{x_k} u_{k,i} + u_0 + I \left[\xi \left(1,1 + \frac{x_2 - x_3}{110} \right) - 1,1\xi_0 \right] \right\}. \quad (6)$$

В формуле (6) через ξ_0 обозначена относительная погрешность отношения токов в левой и правой ветвях мостовой схемы при нулевых показаниях всех декад, через ξ — относительная погрешность этого же отношения при данных показаниях декад, а через F — действительное значение множителя, определяемого выбранным значением рабочего тока I .

7. Мостовой компенсатор типа ПМС-48

Этот компенсатор, так же как и предыдущий, предназначен для измерения малых электродвижущих сил. Он имеет два предела измерения 0,11111 и 0,011111 вольта. В его схеме и конструкции предусмотрены предосторожности против возникновения в цепи измеряемой электродвижущей силы мешающих термоэлектродвижущих сил (т. э. д. с.). Предусмотрена также возможность регулировки сопро-

тивлений посредством специальных реостатов, в результате которой поправочные члены, зависящие от напряжения при нулевом показании и от несоответствия отношения токов его номинальной величине, могут быть доведены до пренебрежимо малых значений. Благодаря этому окончательный вид формулы для измеряемой электродвижущей силы сильно упрощается.

Принципиальная схема этого компенсатора¹ показана на рис. 7. Ток батареи *Б* подводится через щетку к основной декаде *I*. Здесь он разветвляется в отношении 10:1. Большая часть тока идет в левую часть схемы, меньшая — в правую. В левой части включены *II* и *IV*

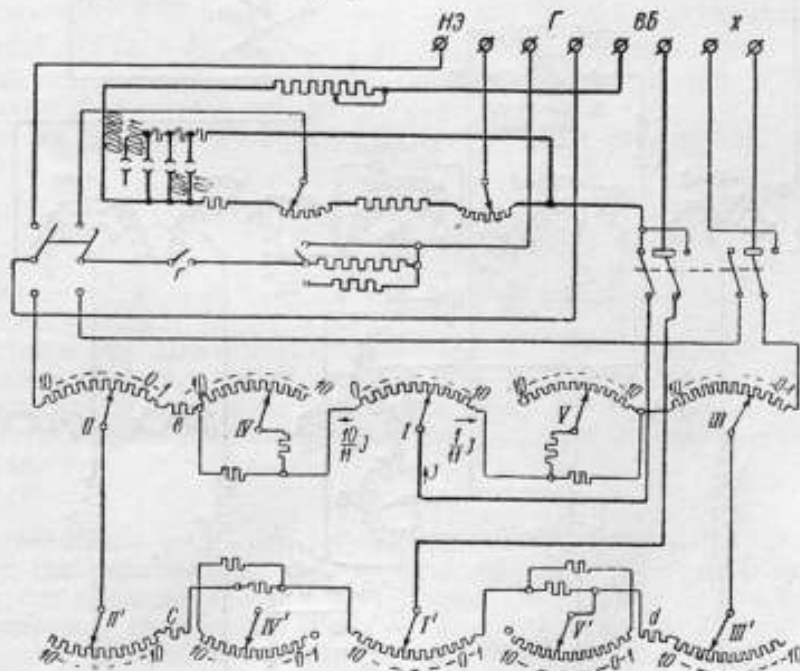


Рис. 6. Принципиальная схема мостовых компенсаторов типов ППТН и КЛ-48.

декады, в правой — *III* и *V*. Щетки декад *II*, *III*, *IV* и *V* соединены с постоянными сопротивлениями, выбранными так, чтобы в них ответвлялись токи, относящиеся к общему току как 0,8:0,08:0,1:0,02:1.

Декады *I*, *II*, *III*, *IV* и *V* образуют измерительное сопротивление компенсатора. Сопротивления и токи декад выбраны так, чтобы при нулевых положениях их переключателей (нулевые положения щеток указаны на рис. 7) сумма падений напряжения в левой части измерительного сопротивления равнялась сумме падений напряжения в правой части и общее напряжение на его концах было равно нулю. При выводе щеток из нулевых положений возникает разность падений напряжения, пропорциональная показаниям декад. В частности, каждое подразделение *I* декады соответствует напряжению 10 000 мкв, *II* декады — 1000 мкв, *III* декады — 100 мкв и т. д.

Благодаря отсутствию скользящих контактов в цепи измерительного сопротивления, которое выполнено целиком из манганина, значительно уменьшается возможность возникновения мешающих термо-

¹ Краткое описание этого прибора см. [4].

электродвижущих сил. С этой же целью измерительное сопротивление заключено в термоуравнивающую камеру и зажимы для измеряемой электродвижущей силы помещены на отдельном щитке внутри компенсатора.

Для исключения влияния на результат измерения остающихся мешающих т. э. д. с. в цепь измерительного гальванометра включен инверсионный переключатель специальной конструкции.

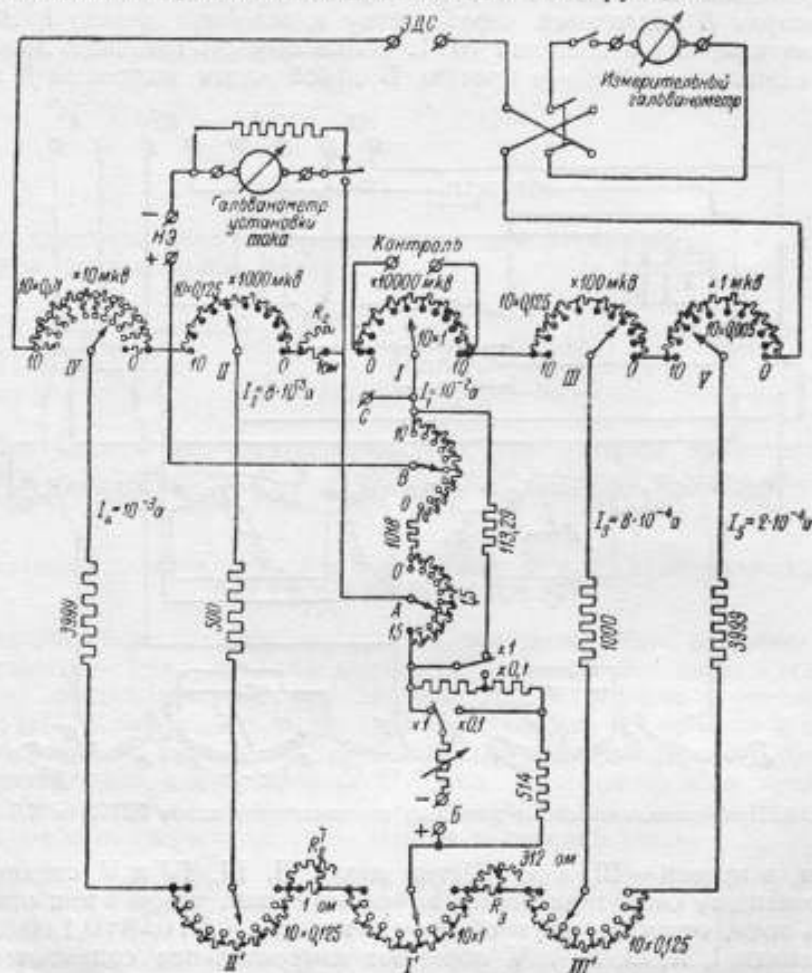


Рис. 7. Принципиальная схема мостового компенсатора типа ПМС-48.

Для сохранения постоянства сопротивления ветвей декад I, II и III предусмотрены замещающие декады I', II' и III', совершенно идентичные основным. Щетки их механически связаны со щетками основных декад. Для поддержания постоянства сопротивления цепи IV декады ее контакты соединены с измерительным сопротивлением через соответствующим образом подобранные добавочные сопротивления. Изменение сопротивления ветви V декады пренебрежимо мало и поэтому в ней не предусмотрено каких-либо средств для поддержания постоянства сопротивления.

На рис. 7 указаны конкретные значения сопротивлений и сил тока в отдельных частях схемы. Рычажные декады А и Б и сопротивления

между ними служат для установки рабочего тока по нормальному элементу. Предусмотрена возможность применять нормальные элементы со значением э. д. с. от 1,01800 до 1,01900 в и устанавливать его через каждые 10 мкв. Для контроля рабочего тока служит отдельный („установочный“) гальванометр.

Реостат R_3 , включенный в правую параллельную ветвь компенсатора, служит для регулировки требуемого отношения токов в обеих ветвях компенсатора. Два совершенно идентичных и механически связанных друг с другом реостата R_2 и R'_2 позволяют устанавливать при нулевом показании напряжение равным нулю, не нарушая отрегулированного отношения токов в левой и правой частях. Наличие реостатов R_2 , R'_2 и R_3 позволяет уменьшить до пренебрежимо малых величин погрешность отношения токов и напряжение при нулевом показании; благодаря этому из формулы для измеряемой э. д. с. исчезают все дополнительные поправочные члены и она принимает простой вид

$$E_x = F \cdot \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^{x_k} u_{k,l}. \quad (7)$$

Как видно из сравнения формул для рассмотренных выше типов компенсаторов, эта формула является наиболее простой и удобной для применения. Для определения измеряемой электродвижущей силы достаточно взять из свидетельства о поверке и просуммировать действительные значения э. д. с. для всех декад и умножить эту сумму на действительное значение множителя F , также указанное в свидетельстве.

Выводы

Приведенное выше рассмотрение некоторых наиболее распространенных схем компенсаторов постоянного тока позволяет сделать заключение, что при практическом применении большинства из них введение поправок требует довольно сложных вычислений. Кроме того, правильная поверка компенсаторов со скользящими шунтирующими декадами требует дополнительных измерений, не предусмотренных действующей инструкцией для поверки компенсаторов.

Пренебрежение данными в работе поправочными членами может привести к заметным погрешностям, причем эти погрешности могут быть особенно большими в схеме компенсаторов типа ПВ-1 и ПВ-2 завода „Эталон“, так как в этой схеме поправки II декады зависят от погрешностей катушек I декады.

Наиболее просты с точки зрения применения результатов поверки при практических измерениях схемы компенсатора с замещающими декадами (типа ПВ-6 завода „Эталон“) и мостового компенсатора типа ПМС-48. Учитывая, что эти схемы имеют и другие преимущества (не рассматриваемые подробно в настоящей статье), их следует считать наиболее пригодными для точных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кротова В. И., Потенциометры, Изд. ВНИИМ, 1940.
2. Широков К. П., Новый шестидекадный потенциометр, Труды ВНИИМ, вып. 6(66), 1949.
3. Широков К. П., О поверке потенциометра по Диссельгорсту, Труды ВНИИМ, вып. 1(56), 1947.
4. Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1951.

ПРИБОР ДЛЯ ТОЧНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ ДВОЙНОГО МОСТА

Для измерения сопротивлений на постоянном токе часто применяется двойной мост, имеющий то преимущество перед компенсационной установкой, что он требует лишь одного источника тока, и при этом устойчивость тока принципиально может быть меньше, нежели устойчивость токов, питающих компенсационную установку. Это имеет особенно большое значение при измерении малых сопротивлений, когда из соображений повышения чувствительности установки приходится пропускать через сравниваемые сопротивления сравнительно большой ток, а емкость имеющейся в распоряжении аккумуляторной батареи недостаточно велика.

Известно, однако [1], что при измерении двойным мостом в результате измерения, получаемый при однократном уравновешивании, входит поправочный член, для вычисления которого требуется знать сопротивление не только плеч моста, но и перемычки R_n (рис. 1). Формула для измеряемого сопротивления может быть, как известно, легко получена после преобразования треугольника, содержащего перемычку, в звезду. Она имеет вид:

$$R_x = R_0 \frac{R_A}{R_B} + \frac{R_n R_\beta}{R_n + R_\beta + R_0} \left(\frac{R_A}{R_B} - \frac{R_n}{R_\beta} \right). \quad (1)$$

В некоторых работах формула приводится в другом, несколько менее удобном виде:

$$R_x = R_0 \frac{R_A}{R_B} + \frac{R_n (R_0 + R_\beta)}{R_n + R_\beta} \left(\frac{R_A}{R_B} - \frac{R_n + R_x}{R_0 + R_\beta} \right). \quad (2)$$

М. А. Быковым [2] выведена формула, в которой поправочный член выражен в функции от относительных разностей сопротивлений „внешних“ и „внутренних“ плеч моста, что облегчает его вычисление по данным поверки моста. С нашими обозначениями эта формула имеет вид:

$$R_x = R_0 \frac{R_A}{R_B} \left[1 + \frac{R_n}{R_x + R_0} \left(\frac{R_A - R_n}{R_A} - \frac{R_B - R_\beta}{R_B} \right) \right]. \quad (3)$$

Вычисление поправочного члена, требующее предварительного измерения сопротивления R_n перемычки между сравниваемыми сопротивлениями, представляет достаточно кропотливую операцию, которая все же не дает полной уверенности в правильности получаемого результата из-за некоторой недостоверности знания всех сопротивлений как вследствие возможных температурных изменений, так и вариации

переходных сопротивлений скользящих и иных контактов, входящих в плечи моста. Естественным поэтому является желание избавиться от необходимости вычислять поправочный член и получить возможность не только при грубых, но и при самых точных измерениях пользоваться для вычисления измеряемого сопротивления R_x простой формулой одинарного моста:

$$R_x = R_0 \frac{R_A}{R_B} \quad (4)$$

Вопросу об уменьшении поправочного члена до пренебрежимо малой величины при обычных измерениях двойным мостом посвящено несколько работ; одной из последних является статья В. А. Кочана [3], в которой предлагается производить измерения путем сравнения с об-

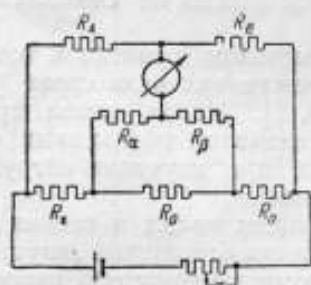


Рис. 1. Принципиальная схема двойного моста.

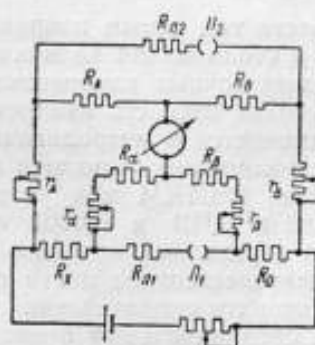


Рис. 2. Схема моста с двумя перемычками для уравнивания по частям.

разцовыми сопротивлениями, во много раз превосходящими измеряемое сопротивление.

Однако эти методы, повышая точность технических измерений, не всегда дают решение задачи, когда требуется наибольшая достижимая точность. В этих случаях лучшие результаты дает уравнивание двойного моста по частям, т. е. такое, когда для любой пары плеч моста достигается равенство отношения плеч отношению сравниваемых сопротивлений R_x и R_0 . В этом же отношении должны находиться и не отмеченные на рис. 1 сопротивления соединительных проводников и контактов, всегда присутствующие в реальном мосте. При соблюдении этих условий $\frac{R_x}{R_0}$ можно определить из отношения любой пары соответствующих плеч моста, но удобнее всего базироваться на значении „внешних“ плеч $\frac{R_A}{R_B}$; знание же других плеч, в частности и сопротивления соединительных проводников и контактов, не обязательно.

Схема моста с дополнительными сопротивлениями, включенными последовательно с основными сопротивлениями плеч, представлена на рис. 2. Чтобы осуществить указанное выше уравнивание, в схеме предусмотрены две размыкаемые перемычки P_1 и P_2 , которые дают следующие четыре видоизменения схемы:

1. Перемычка P_1 замкнута, перемычка P_2 разомкнута. Нормальная схема двойного моста, уравнивание производится изменением сопротивления R_A (или R_B).

2. Обе переключки P_1 и P_2 замкнуты. Двойной мост с выключенными сопротивлениями R_A и R_B , уравниваемый изменением сопротивления r_A (или r_B).

3. Обе переключки P_1 и P_2 разомкнуты. Простой одинарный мост, уравниваемый изменением сопротивления R_x (или R_3).

4. Переключка P_2 замкнута, а переключка P_1 разомкнута. Это видоизменение схемы, в котором уравнивание может производиться также изменением сопротивления r_A (или r_B), самостоятельного значения не имеет, но может использоваться для контроля точности уравнивания в других схемах.

Поочередное уравнивание этих видоизменений схемы позволяет сделать отношения всех парных элементов моста равными $\frac{R_x}{R_0}$ и привести тем самым поправочный член в формуле для основной схемы к столь малой величине, что с ней можно не считаться даже при самых точных измерениях.

Высокая точность измерений этим методом привела к тому, что он применяется в метрологических учреждениях ряда стран [4, 5] и в Международном бюро мер и весов [6, 7]. Метод нашел применение и во ВНИИМ при установлении значений образцовых сопротивлений в 0,001 и 0,0001 ом, а также при изучении нагрузочных свойств образцовых катушек сопротивления.

Уравнивание моста требует наличия малых и весьма плавно изменяющихся сопротивлений для приведения отношений „внутренних“ плеч и соединительных проводников к тому же значению, какое имеет отношение сравниваемых катушек. Малые плавно регулируемые сопротивления, осуществленные из отдельных катушек и шунтирующих их магазинов сопротивления, неудобны в работе и занимают много места. Поэтому под руководством автора настоящей статьи был сконструирован прибор, представляющий как бы центральный узел моста, к которому присоединяются провода от потенциальных зажимов сравниваемых сопротивлений, внешних и внутренних плеч моста, а также гальванометра. В прибор встроены весьма плавно регулируемые реостаты и некоторые вспомогательные элементы.

Схема двойного моста с новым прибором показана на рис. 3. Сравнимые сопротивления R_x и R_0 включены в цепь питающей батареи через переключку P_1 , которая представляет собой мощный штепсельный контакт с припаянными к нему двумя гибкими кабелями большого сечения. Общее сопротивление штепсельного контакта вместе с кабелями составляет около 0,0002 ом. Вместе с участками сравниваемых катушек от токовых до потенциальных выводов сопротивление $R_{п1}$ составляет около 0,0003 ом. Переключка P_2 выполнена также в виде штепсельного контакта, но меньшего размера, чем P_1 , так как по ней идет значительно меньший ток и малая величина ее сопротивления не столь существенна.

Плечи моста R_A , R_B , R_x и R_3 обычно выполняются из образцовых катушек сопротивления, причем R_A и R_B должны быть известны как можно точнее. Последовательно с сопротивлениями R_A , R_B , R_x и R_3 включены реостаты r_A , r_B , r_x и r_3 , входящие в конструкцию прибора для уравнивания. Каждый комплект реостатов имеет наименьшее сопротивление 0,09 ом и наибольшее — 0,098 ом, причем обеспечена возможность регулирования его через доли микроома. Большое внимание обращено на надежность скользящих контактов, чтобы само-

произвольные колебания включенного сопротивления были минимальны.

От соответствующих точек моста выведены провода к зажимам гальванометра. В приборе имеются кнопки для включения гальванометра через балластное сопротивление и без него, реостат для успокоения гальванометра, включающийся при выключении гальванометра из цепи моста, и переключатель направления тока гальванометра (для исключения влияния паразитных т. э. д. с. в его цепи). Специальным штепселем один из концов гальванометра можно включать либо к за-

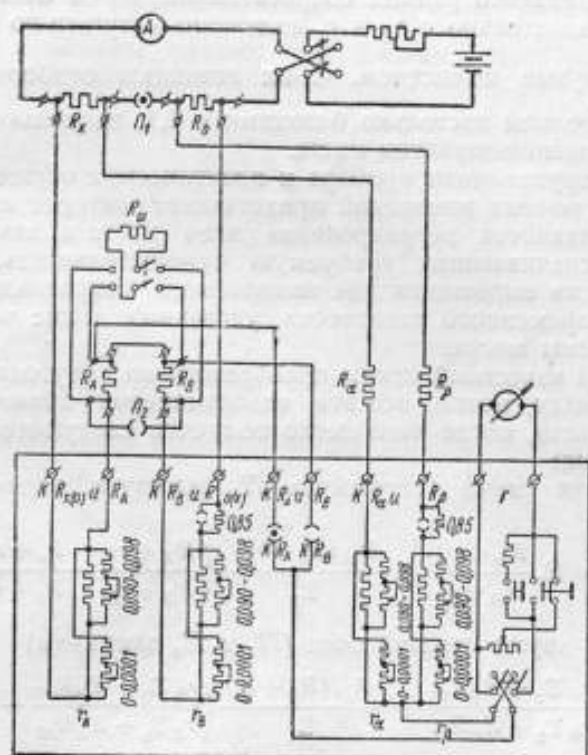


Рис. 3. Общая схема с прибором для уравнивания по частям.

жиму R_A , либо к зажиму R_B , благодаря чему возможно исключить влияние соединительного проводника между этими катушками.

Практически уравнивание моста с помощью сконструированного прибора производится следующим образом.

В обычной схеме моста, при замкнутой перемычке Π_1 , приблизительно уравнивают мост изменением сопротивления $R_{ш}$, включенного параллельно R_A или R_B . Далее замыкают перемычку Π_2 и производят новое уравнивание, регулируя реостаты r_A или r_B . Затем размыкают обе перемычки и добиваются равновесия регулированием реостатов r_C или r_D , после чего возвращаются к основной схеме с замкнутой перемычкой Π_1 и уравнивают мост со всей тщательностью. Повторяя остальные операции, достигают одновременного равновесия всех трех схем. Для контроля равновесие может быть проверено в четвертой схеме, с разомкнутой перемычкой Π_1 и замкнутой Π_2 .

Естественно, что при переходе от одной схемы к другой сила тока, питающего мост, должна изменяться. Наибольшей она должна быть при нормальной схеме, наименьшей — в схеме с обеими разомкнутыми переключателями.

Обычно, если параметры моста правильно подобраны, уже при втором прохождении цикла уравнивания отклонения от равновесия при переходе от одной схемы к другой становятся пренебрежимо малыми.

Чтобы иметь возможность уравнивать мост не только при сравнении номинально равных сопротивлений, но и отличающихся в 10 раз, последовательно с r_B и r_β включены катушки по 0,85 ом, нормально замкнутые штепселем. С их помощью отношения $\frac{r_A}{r_B}$ и $\frac{r_\alpha}{r_\beta}$ могут быть сделаны настолько близкими к 0,1, насколько это требуется при уравнивании моста.

При конструировании прибора и практическом осуществлении метода с целью точных измерений представляет интерес выяснение необходимой плавности регулирования плеч моста и значений токов питания, обеспечивающих требуемую чувствительность. Это можно сделать, написав выражения для измеряемого сопротивления R_x , при условии одновременного равновесия указанных выше четырех видоизменений схемы моста.

Используя известный прием преобразования треугольника в эквивалентную звезду, можно все эти видоизменения привести к схеме одинарного моста, после чего легко получить следующие окончательные выражения:

1) основная схема (переключатель Π_1 замкнут, переключатель Π_2 разомкнут)

$$R_x = R_0 \frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} + \frac{R_{n1}(R_\beta + r_\beta)}{\Sigma_1} \left(\frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} - \frac{R_\alpha + r_\alpha}{R_\beta + r_\beta} \right); \quad (5)$$

2) мост с двумя переключателями (Π_1 и Π_2 замкнуты)

$$R_x = R_0 \frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_B \Sigma_2 + R_B R_{n2}} + \frac{R_{n1}(R_\beta + r_\beta)}{\Sigma_1} \left(\frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_B \Sigma_2 + R_B R_{n2}} - \frac{R_\alpha + r_\alpha}{R_\beta + r_\beta} \right); \quad (6)$$

3) мост без переключателей (Π_1 и Π_2 разомкнуты)

$$R_x = R_0 \frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} + (R_\beta + r_\beta) \left(\frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} - \frac{R_\alpha + r_\alpha}{R_\beta + r_\beta} \right); \quad (7)$$

4) вспомогательный мост с одной переключателем (Π_1 разомкнут, Π_2 замкнут).

$$R_x = R_0 \frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_B \Sigma_2 + R_B R_{n2}} + (R_\beta + r_\beta) \left(\frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_B \Sigma_2 + R_B R_{n2}} - \frac{R_\alpha + r_\alpha}{R_\beta + r_\beta} \right). \quad (8)$$

В формулах (5) — (8) для сокращения обозначено:

$$\Sigma_1 = R_\alpha + R_\beta + r_\alpha + r_\beta + R_{n1};$$

$$\Sigma_2 = R_A + R_B + R_{n2}.$$

Вычитание уравнения (7) из уравнения (5) и соответственно (8) из уравнения (6) дает:

$$\frac{R_{n1}}{\Sigma_1} (R_{\beta} + r_{\beta}) \left(\frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} - \frac{R_a + r_a}{R_{\beta} + r_{\beta}} \right) = (R_{\beta} + r_{\beta}) \left(\frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} - \frac{R_a + r_a}{R_{\beta} + r_{\beta}} \right); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{R_{n1}}{\Sigma_1} (R_{\beta} + r_{\beta}) \left(\frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_{\beta} \Sigma_2 + R_B R_{n2}} - \frac{R_a + r_a}{R_{\beta} + r_{\beta}} \right) = \\ & = (R_{\beta} + r_{\beta}) \left(\frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_{\beta} \Sigma_2 + R_B R_{n2}} - \frac{R_a + r_a}{R_{\beta} + r_{\beta}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Так как $\frac{R_{n1}}{\Sigma_1}$ ни при каких условиях не может быть равно единице, то равенства возможны только, если скобки, содержащие разности, равны нулю. Поэтому можно написать:

$$\frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} = \frac{R_a + r_a}{R_{\beta} + r_{\beta}};$$

$$\frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_{\beta} \Sigma_2 + R_B R_{n2}} = \frac{R_a + r_a}{R_{\beta} + r_{\beta}},$$

откуда следует, что

$$\frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} = \frac{r_A \Sigma_2 + R_A R_{n2}}{r_{\beta} \Sigma_2 + R_B R_{n2}} = \frac{R_{n2} (R_A + r_A) + r_A (R_A + R_B)}{R_{n2} (R_B + r_B) + r_B (R_A + R_B)}$$

Учитывая свойства производных пропорций, можно написать

$$\frac{R_A + r_A}{R_B + r_B} = \frac{r_A (R_A + R_B)}{r_B (R_A + R_B)} = \frac{r_A}{r_B} = \frac{R_A}{R_B}, \quad (11)$$

или, принимая во внимание уравнение (5),

$$\frac{r_A}{r_B} = \frac{R_A}{R_B} = \frac{R_a + r_a}{R_{\beta} + r_{\beta}} = \frac{R_x}{R_0}, \quad (12)$$

откуда окончательно

$$R_x = R_0 \frac{R_A}{R_B}, \quad (13)$$

т. е. поправочный член в ф-ле (1) при указанном способе уравнивания становится пренебрежимо малым, и результат измерения может вычисляться по простой формуле одностороннего моста.

Обратимся к поставленному выше вопросу, каковы должны быть плавность регулирования сопротивлений плеч и значение тока питания моста, чтобы обеспечить заданную точность уравнивания. Заметим, что сопротивления r_a и r_{β} всегда включены совместно с сопротивлениями R_a и R_{β} , поэтому в дальнейшем мы не будем разделять эти слагаемые, обозначая общие сопротивления внутренних плеч через R_a и R_{β} .

Уравнения (5) + (8) практически не удовлетворяются совершенно точно вследствие того, что сопротивления R_A , r_A и R_a отличаются на малые величины от значений, требуемых для полного равновесия моста. Если производить повторные уравнивания при неизменных условиях, то отклонения ΔR_A , Δr_A и ΔR_a будут принимать случайные значения. Общая погрешность ΔR_x в этом случае может быть най-

дена на основании закона сложения средних погрешностей. Исходя из ф-лы (5) для основной схемы моста, получаем:

$$(\Delta R_x)^2 = \left[\left(R_0 + R_{n1} \frac{R_\beta}{R_x + R_\beta} \right) \left(\frac{1}{R_B + r_B} \right) \right]^2 (\Delta R_A)^2 + \left[\left(R_0 + R_{n1} \frac{R_\beta}{R_x + R_\beta} \right) \left(\frac{1}{R_B + r_B} \right) \right]^2 (\Delta r_A)^2 + \left[\frac{R_{n1}}{R_x + R_\beta} \right]^2 (\Delta R_s)^2. \quad (14)$$

Уравновешивание должно выполняться так, чтобы погрешность ΔR_x зависела только от неточности регулирования плеча R_A ; погрешности же от неточности уравновешивания видоизмененных схем моста были бы по крайней мере в три раза меньше этой основной погрешности и таким образом могли бы считаться ничтожными.

При этом условии

$$\Delta R_x = \left(R_0 + \frac{R_{n1} R_\beta}{R_x + R_\beta} \right) \left(\frac{1}{R_B + r_B} \right) \Delta R_A,$$

откуда

$$\frac{\Delta R_A}{R_A} = \frac{R_x R_B (R_x + R_\beta)}{R_A [R_0 (R_x + R_\beta) + R_{n1} R_\beta]} \cdot \frac{\Delta R_x}{R_x}.$$

Поскольку всегда

$$R_A \cong R_0, \quad R_B \cong R_\beta \quad \text{и} \quad R_x = \frac{R_A}{R_B} R_0,$$

то

$$\frac{\Delta R_A}{R_A} = \frac{R_x R_B (R_A + R_B)}{R_A [R_0 (R_A + R_B) + R_{n1} R_B]} \cdot \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_x + R_0}{R_x + R_0 + R_{n1}} \cdot \frac{\Delta R_x}{R_x}. \quad (15)$$

Для того чтобы второй и третий члены выражения погрешности измеренного значения R_x были ничтожны по сравнению с первым, должны выполняться неравенства:

$$\frac{\Delta r_A}{R_A} < \frac{1}{3} \frac{\Delta R_A}{R_A} \quad (16)$$

и

$$\frac{\Delta R_A}{R_A} < \frac{1}{3} \left(\frac{R_0 R_A + R_B}{R_{n1} R_B} + 1 \right) \frac{\Delta R_A}{R_A}. \quad (17)$$

Выражения (15), (16) и (17) дают возможность найти требуемую плавность регулирования сопротивлений R_A , r_A и R_s , в зависимости от значений R_x , R_0 и R_{n1} , а также допустимой погрешности ΔR_x . Значения для различных случаев сопротивлений приведены в табл. 1, 2 и 3.

Перейдем теперь к выяснению значений тока питания моста, обеспечивающих заданную точность уравновешивания. Будем исходить из определенных выше допустимых отклонений плеч. Токи, питающие различные видоизменения схемы, очевидно, должны быть такими, чтобы при данном гальванометре можно было распознавать эти отклонения.

Найдем ток питания моста для случая основной схемы. Положим, что при значениях сопротивлений, указанных на рис. 2, мост полностью уравновешен. Если теперь плечо R_A получит приращение ΔR_A , то через гальванометр пойдет ток.

Выражение для тока i в гальванометре, которое может быть найдено любым из известных способов, имеет вид:

$$i \cong \frac{I_1 (R_x + R_0 + R_{n1}) R_B \Delta R_A}{\left(R_r + 2 \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \right) (R_A + R_B)^2}$$

При выводе было принято во внимание, что в настоящей работе рассматриваются лишь случаи, когда $R_x \leq 1$ ом, а плечи моста имеют сопротивления не менее 10 ом. Поскольку ток i достаточно знать лишь приблизительно, в выражении для i можно пренебречь сопротивлениями R_{n1} , R_x , R_0 , r_A и r_B , когда они складываются с сопротивлениями R_A , R_B , R_x и R_β .

Если положить, что $i = i_{\text{мин}}$ есть наименьший ток, обнаруживаемый данным гальванометром, а ΔR_A — приращение сопротивления R_A , соответствующее заданной точности уравнивания, из него можно непосредственно найти ток питания моста I_1 , обеспечивающий требуемую чувствительность:

$$I_1 \cong \frac{i_{\text{мин}} \left(R_r + 2 \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \right) (R_A + R_B)^2}{(R_x + R_0 + R_{n1}) R_B \Delta R_A} \quad (18)$$

Совершенно аналогично можно найти выражения минимальных токов питания для остальных трех видоизменений схемы моста

$$I_2 \cong \frac{i_{\text{мин}} \left(R_r + 2 \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \right) (r_A + r_B) (r_A + r_B + R_x + R_0 + R_{n1})}{(R_x + R_0 + R_{n1}) r_B \Delta r_A}; \quad (19)$$

$$I_3 \cong \frac{i_{\text{мин}} [2R_r (R_A + R_B) + 4R_A R_B]}{R_B \Delta R_x}; \quad (20)$$

$$I_4 \cong \frac{i_{\text{мин}} \left(R_r + 2 \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \right) (r_A + r_B)}{r_B \Delta r_A} \quad (21)$$

В случае, если в основной схеме отклонение гальванометра вызывается изменением не сопротивления R_A , а самого измеряемого сопротивления (например, при измерениях методом замещения), формула для тока питания может быть написана в виде

$$I_1 \cong \frac{i_{\text{мин}} \left(R_r + 2 \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \right) (R_A + R_B)}{R_B \Delta R_x} \quad (22)$$

Покажем на примерах применение ф-л (15) — (21). В поверочной практике чаще всего приходится измерять сопротивления с номинальными значениями 10^n ом (n — целое число), сличая их с равными или в 10 раз большими образцовыми сопротивлениями. Двойным мостом удобнее всего измерять сопротивления от 1 до 0,0001 ом. Сопротивления плеч A , B , α , β могут равняться 100 или 10 ом. В соответствии с этим возможные случаи можно разделить на три группы:

а) сравнение равных сопротивлений, — плечи A , B , α , β — по 100 ом каждое;

б) то же, но плечи моста имеют по 10 ом;

в) сравнение сопротивлений, находящихся в отношении 1:10.

Остальные параметры моста выберем соответствующими реальной схеме, применяемой в Лаборатории электрических измерений ВНИИМ: сопротивления $r_A \approx 0,1$ ом; $r_B \approx 0,1$ или 1 ом, сопротивление перемычки $R_{nl} = 0,0003$ ом, порог чувствительности гальванометра $i_{мин} = 7,5 \cdot 10^{-10}$ а, внутреннее сопротивление гальванометра $R_r = 11$ ом, допустимая погрешность уравновешивания $\frac{\Delta R_x}{R_x} = 10^{-6}$.

Результаты подсчетов для указанных выше трех групп, получившие подтверждение при экспериментальной проверке, сведены в табл. 1, 2 и 3.

Сравнение данных табл. 1 и 2 приводит к заключению что, если применять гальванометр с указанными выше параметрами, более высокой чувствительностью обладает мост с десятиными плечами. Если поставить условием, чтобы наименьшее относительное изменение измеряемого сопротивления, могущее быть обнаруженным, не

Таблица 1

Сравнение равных сопротивлений при плечах моста по 100 ом

$$R_0 = R_x; R_A = R_B = R_\alpha = R_\beta = 100 \text{ ом}; r_A = r_B = 0,1 \text{ ом};$$

$$R_{nl} = 0,0003 \text{ ом}; \frac{\Delta R_x}{R_x} = 10^{-6}.$$

R_x	ΔR_A	Δr_A	ΔR_α	i_1	i_2	i_3	i_4
1	$1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	0,22	0,17	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$
0,1	$1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	1,67	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
0,01	$1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	16,7	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
0,001	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	167	0,50	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
0,0001	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	1670	5,1	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

Сравнение равных сопротивлений при плечах моста по 10 ом

$$R_0 = R_x; R_A = R_B = R_\alpha = R_\beta = 10 \text{ ом}; r_A = r_B = 0,1 \text{ ом};$$

$$R_{nl} = 0,0003 \text{ ом}; \frac{\Delta R_x}{R_x} = 10^{-6}.$$

R_x	ΔR_A	Δr_A	ΔR_α	i_1	i_2	i_3	i_4
1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,31	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
0,01	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	3,1	0,10	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
0,001	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	31	0,95	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
0,0001	$4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	310	9,5	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3

Сравнение сопротивлений в отношении 1 : 10

$$R_0 = 10R_x; R_A = R_x = 10 \text{ ом}; R_B = R_3 = 100 \text{ ом}; r_A = 0,1 \text{ ом}; r_B = 1 \text{ ом};$$

$$R_{м1} = 0,0003; \frac{\Delta R_x}{R_x} = 10^{-6}.$$

R_x	ΔR_A	Δr_A	ΔR_2	I_1	I_2	I_3	I_4
0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,24	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$
0,01	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	2,4	$8 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$
0,001	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	24	0,71	$4 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$
0,0001	$7,9 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	240	7,2	$4 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-3}$

превышало 10^{-6} , как это и принято при вычислении данных табл. 1, 2 и 3, то мост с десятичными плечами позволяет производить сравнения сопротивлений от 1 до 0,001 ом при выделяемой в катушках мощности не более 1 вт, и сопротивлений в 0,0001 ом при мощности не более 10 вт.

Сравнение сопротивлений, отличающихся в 10 раз, в схеме моста с плечами 10 и 100 ом, при мощности, выделяемой в большем из сопротивлений, не превышающей 1 вт, возможно лишь для пар 0,1 : 1 и 0,01 : 0,1 ом, для пар же 0,001 : 0,01 и 0,0001 : 0,001 ом мощность достигает 6 и 60 вт соответственно. Однако по мере уменьшения номинальных значений сопротивлений естественный предел рассеиваемой мощности повышается; он может быть еще увеличен при специальной конструкции катушки, предусматривающей водяное охлаждение. Образцовые сопротивления, рассчитанные на мощность 150, 500 и более ватт, не являются редкостью. При передаче верных значений в область малых сопротивлений следует применять именно такие сопротивления, по которым можно в дальнейшем аттестовать образцовые меры обычной конструкции.

Табличные данные позволяют сделать заключение, что плавность регулирования элементов моста R_A , r_A и R_2 должна быть одного порядка. В частности, при допустимой относительной погрешности уравновешивания, равной 10^{-6} , должна быть обеспечена возможность регулировать эти элементы через единицы микроома. Этому требованию вполне удовлетворяют реостаты описанного выше прибора.

Прибор представляет собой ящик небольших размеров, на верхней панели которого расположены рукоятки реостатов, штепсели и кнопки переключателей, а также зажимы для присоединения основных сопротивлений плеч моста и гальванометра. Применение прибора позволяет значительно упростить сборку схемы моста, уменьшить занимаемое им место и, главное, ускорить процесс уравновешивания. Использование прибора в работах Лаборатории электрических измерений подтвердило его целесообразность и возможность производить с его помощью точные определения сопротивлений от 1 до 0,0001 ом. При точных измерениях необходимо принимать меры к защите моста от утечек методом равнопотенциального экранирования, к исключению влияния паразитных термоэлектродвижущих сил путем измерений при различных направлениях тока в мосте, а также к стабилизации температуры входящих в мост сопротивлений. При этих условиях точ-

ность результатов по существу ограничивается лишь достоверностью знания образцового сопротивления и отношения плеч $\frac{R_A}{R_B}$. При сравнении равных по номинальным значениям сопротивлений точность может быть более повышена применением метода замещения, при котором сравниваемые сопротивления включаются в одно и то же плечо моста.

В заключение необходимо отметить, что в работе большое участие принимала Е. К. Вессо-Адо, выполнившая с помощью нового прибора большое число измерений высокой точности. Рассмотрение результатов этих измерений не относится, однако, к настоящей работе, поскольку темой ее является не выяснение достижимой точности измерений двойным мостом, а лишь освещение некоторых связанных с его уравниванием вопросов, остававшихся до сего времени неясными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карандеев К. Б., Методы электрических измерений, Госэнергоиздат, 1952.
2. Быков М. А., „Электричество“, 1949, № 8.
3. Кочан В. А., „Электричество“, 1953, № 3.
4. Jaeger W., Lindeck St. u. Diesselhorst H., Zeitschr. für Instrumentenkunde, 23 (1908), 33.
5. Wenner F., Journ. of Res. of the Nat. Bureau of Standards, 25 (1940) No 2, pp. 229—293.
6. Romanowsky M., Rev. Gen. Electr. 48 (1940), Juillet, 41—50.
7. Romanowsky M., Travaux et Memoires du Bureau Intern. des Poids et Mesures, XXI (1952).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИИ

Введение

Изучение явления магнитострикции имеет в настоящее время весьма существенное теоретическое и практическое значение при исследовании процессов намагничивания в ферромагнитных материалах.

Основной проблемой при определении магнитострикции является измерение малых изменений длины, которые имеют величину порядка микрона и долей микрона.

Для известных ферромагнетиков максимальное относительное изменение их линейных размеров в магнитном поле (линейная магнитострикция) достигает $-1 \cdot 10^{-4}$.

Существующие методы измерений этих изменений длины сводятся к следующим основным группам:

1. Измерения, использующие оптическое и механическое увеличение измеряемой величины.
2. Интерференционные измерения.
3. Электрические измерения малых перемещений.

Применявшаяся до сего времени аппаратура, как правило, позволяла определять магнитострикцию в зависимости от напряженности внешнего намагничивающего поля. Если же принять во внимание, что эти измерения производятся в разомкнутой магнитной цепи, то величина напряженности внешнего магнитного поля не может в полной мере характеризовать намагниченность образца.

С измерительной точки зрения важно иметь в виду, что магнитострикция изменяется в зависимости от намагниченности испытуемого образца.

Настоящая статья посвящена разработке установки для измерения магнитострикции в зависимости от намагниченности образца.

1. Метод и аппаратура

При создании измерительной аппаратуры предусматривалась возможность определения кривых магнитострикции визуальным методом, а также фотографической записи этой зависимости для образцов магнитномягких материалов. В качестве образцов для испытания были выбраны цилиндрические стержни длиной 100 мм и диаметром 3 мм.

В основу разработки измерительных устройств был положен оптико-механический принцип измерения магнитострикции и магнитометрический метод измерения намагниченности испытуемого образца.

Принципиальная схема всей измерительной установки изображена на рис. 1.

Основными элементами этой установки являются:

1 — намагничивающая катушка для намагничения испытуемого образца; 2 — компенсирующая катушка для компенсации магнитного поля, создаваемого первой катушкой в пространстве, занимаемом магнитной системой магнитометра; 3 — держатель с испытуемым образцом; 4 — магнитоотрицательный измеритель; 5 — осветитель; 6, 7, 8, 9 — зеркала оптической системы для передачи светового луча от осветителя до зеркала измерителя и далее от зеркала измерителя на зеркало магнитометра; 10, 11 — астатическая система магнитов магнитометра; 12 — зеркало магнитометра; 13 — нити-растяжки магнитометра; 14 — приспособление для регулировки чувствительности магнитометра; 15 — катушки Гельмгольца для градуировки магнитометра; 16 — шкала-экран.

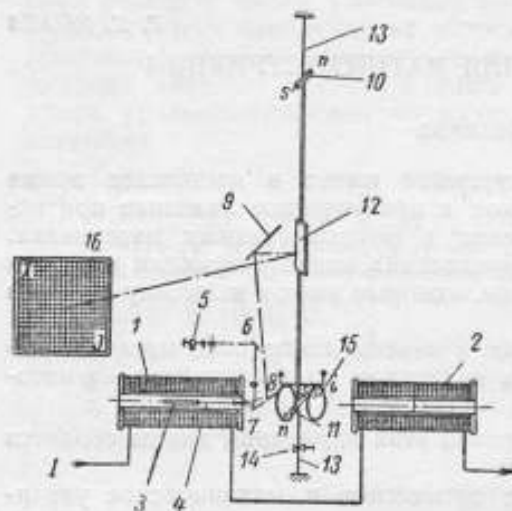


Рис. 1. Схема магнитоотрицательной измерительной установки.

Как видно из рис. 1, при намагничении испытуемого образца магнитоотрицательный измеритель будет давать поворот светового луча в вертикальной плоскости, а магнитометр — в горизонтальной плоскости.

Благодаря одновременному вращению зеркала магнитоотрицательного измерителя и зеркала магнитометра во взаимно перпендикулярных плоскостях световой указатель будет перемещаться по поверхности экрана. При этом ордината

светового указателя будет соответствовать величине магнитоотрицательности, а абсцисса — величине намагниченности образца.

Наиболее ответственным узлом в измерительной установке является магнитоотрицательный измеритель.

Принципиальная схема измерителя представлена на рис. 2.

Испытуемый образец 2 жестко закрепляется одним концом в держателе 1, а второй его конец помещается между роликами 3 и упирается в агатовый наконечник 4 рычага 5, который может поворачиваться вокруг оси 12.

Наконечник рычага 6 в виде ножа с закругленной торцевой поверхностью упирается в ось 10 зеркала 7. Пружина 11 служит для того, чтобы наконечник 4 всегда прижимался к образцу. При изменении длины образца рычаг 5 поворачивается в ту или другую сторону и тем самым вызывает поворот зеркала. Для наблюдения за отклонениями зеркала служит осветитель 9 со шкалой 8.

Величина магнитоотрицательности λ определяется из выражения:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = \frac{r}{2d} \cdot \frac{x}{y} \cdot \frac{a}{l}, \quad (1)$$

где Δl — изменение длины образца;

l — длина образца;

r — радиус оси зеркала;

d — расстояние между зеркалом и шкалой;

x — плечо рычага 5;
 y — радиус вращения наконечника 6;
 a — перемещение светового указателя по шкале.

При этом имеется в виду, что Δl очень мало и угол, на который поворачивается рычаг, также мал.

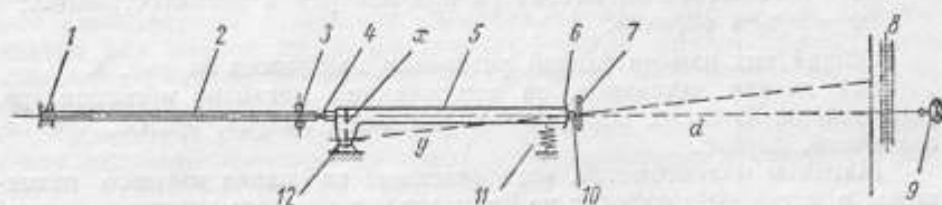


Рис. 2. Схема магнитострикционного измерителя.

В изготовленном нами измерителе имеем:

$$d = 1500 \text{ мм}; \quad \frac{x}{y} = 0,1; \quad l = 100 \text{ мм};$$

$a = 300 \text{ мм}$ — максимальная величина; $r = 0,6 \text{ мм}$, что позволяет измерять наибольшую величину магнитострикции порядка $6 \cdot 10^{-5}$.

Общий вид измерителя с держателем образца показан на рис. 3.

Измеритель и держатель образца смонтированы на общем основании.



Рис. 3. Магнитострикционный измеритель.

Для обеспечения соприкосновения рычага измерителя с образцом предусмотрен подающий механизм, имеющий винтовое перемещение.

При изготовлении измерителя было обращено особое внимание на подбор материалов для подвижных элементов, магнитная восприимчивость которых не должна была превышать $1 \cdot 10^{-5}$ единиц $CGS\mu_0$.

Для изготовления осей рычага и зеркала измерителя был использован вольфрам. В качестве опор для вольфрамовых кернов применены рубиновые подпятники, запрессованные в установочные латунные винты.

Отдающая пружина измерителя изготовлена из фосфористой бронзы. Остальные узлы измерителя и держателя образца изготовлены из латуни.

Магнитострикционный измеритель с держателем образца помещены в намагничивающую катушку магнитометра.

Для измерения намагниченности испытуемого образца служит магнитометр.

Намагниченность образца определяется по формуле

$$J = \frac{C_m \alpha}{v}, \quad (2)$$

где C_m — постоянная магнитометра в единицах магнитного момента;
 α — отклонение магнитометра при измерении магнитострикции;
 v — объем образца.

Общий вид измерительной установки изображен на рис. 4.

Все детали установки, за исключением магнитов магнитометра, изготовлены из таких материалов, как медь, латунь, бронза, стекло, алюминий, дерево.

Магниты магнитометра, изготовленные из сплава магния, размещены в магнитодержателях на концах алюминиевого стержня длиной

1000 мм, в средней части которого закреплено зеркало длиной 150 мм и шириной 15 мм. Стержень прикреплен к верхней и нижней регулировочным головкам магнитометра ленточными растяжками из фосфористой бронзы. Общая длина растяжек 300 мм.

Для обеспечения электромагнитного успокоения подвижной части магнитометра магниты помещены в массивные медные оправки-успокоители.

Вся астатическая система магнитометра заключена в латунную трубу с домиком для нижнего магнита. Домик магнита помещен на основание магнитометра, состоящее из двух симметрично расположенных кронштейнов, покоящихся на нижней раме. Основание устанавливается на плите

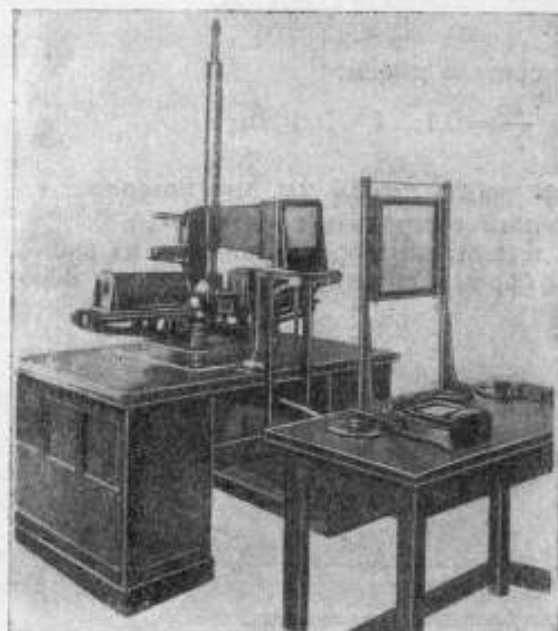


Рис. 4. Измерительная установка.

амортизирующего устройства посредством трех регулировочных винтов.

На кронштейнах основания расположены две намагничивающие катушки, в одну из которых помещается магнитострикционный измеритель и держатель испытуемого образца.

Вторая катушка является компенсационной.

Катушки устанавливаются на плитах, которые перемещаются вдоль оси кронштейнов с помощью ходовых винтов.

Обмотка каждой катушки навита на латунном каркасе с внутренним окном 25×35 мм² и расстоянием между фланцами 380 мм.

Между каркасом и обмоткой проложена теплоизоляционная прокладка из фетра толщиной 10 мм, поверх которой наложены гетинаксовые листы. Сделано это с целью поддержания постоянной температуры во время измерения магнитострикции.

Обмотка выполнена из медного провода ПВД диаметром 1,95 мм из расчета на напряженность поля в 500 э при силе тока в 5 а. Неоднородность магнитного поля по оси катушки на расстоянии 50 мм от центра не превышает 1%.

С трубой магнитометра скреплена оптическая система и фотокамера. Оптическая система включает в себя двойной осветитель револьверного типа, вспомогательный осветитель и систему зеркал. Двойной револьверный осветитель, совместно с системой зеркал, предназначен для подачи светового луча на зеркало магнитоотрикссионного измерителя, далее на зеркало магнитометра и на фотоэкран или на экран-шкалу.

Осветитель рассчитан таким образом, чтобы на фотоэкране можно было получать точечное световое пятно диаметром порядка 0,5 мм,

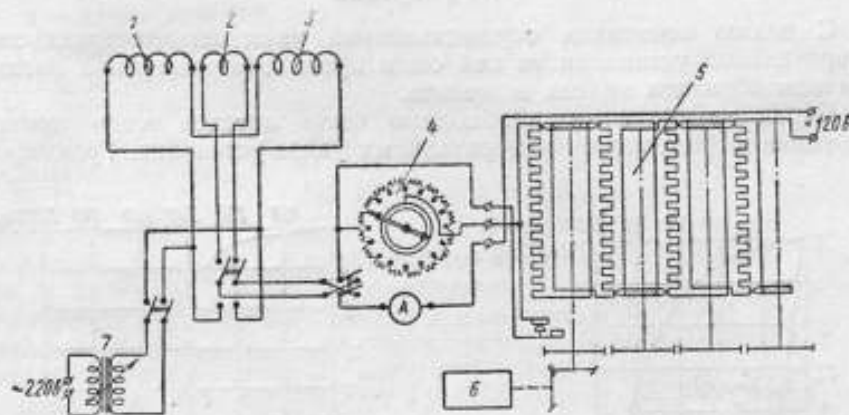


Рис. 5. Электрическая схема измерительной установки:

1—намагничивающая катушка; 2—катушка Гельмгольца; 3—компенсирующая катушка; 4—рычажный реостат 0—60000 ом; 5—регулирующее устройство 0—6000 ом; 6—электрический двигатель; 7—размагничивающее устройство

а на экране-шкале — светящееся пятно диаметром около 20 мм с крестом из тонких нитей.

В оптическом устройстве предусмотрен вспомогательный осветитель, который служит для подачи светового луча на зеркало магнитометра и далее на фотоэкран в виде светящейся точки. При фотозаписи кривых магнитоотрикссионной последней дает запись оси абсцисс графика кривой.

Фотокамера, спреленная с трубой магнитометра, заканчивается гибкой гармошкой с рамой, в которой помещается фотоэкран или — при фотозаписи — кассета со светочувствительной бумагой размером 200×200 мм². Кассета помещается на расстоянии 610 мм от зеркала магнитометра и посредством регулировочных винтов, связанных с рамой фотокамеры и кронштейном, может перемещаться для фокусировки в пределах 50 мм.

Во избежание влияния внешних вибраций на работу чувствительных элементов, весь магнитометр с катушками и оптикой помещен на амортизирующее устройство. Последнее представляет собою платформу, опирающуюся на четыре рычага. Рычаги, в свою очередь, связаны с четырьмя пружинами, подвешенными к крышке стола.

Для визуальных измерений служит экран-шкала размером 300×300 мм², помещенная на столе управления. На том же столе раз-

мещены приборы включения регулировки и измерения тока, подаваемого в обмотки намагничивающих катушек магнитометра.

Для плавной регулировки тока служит реостатное устройство, равномерное перемещение ползунков которого осуществляется посредством электрического двигателя.

Принципиальная электрическая схема установки изображена на рис. 5.

В схеме предусмотрен амперметр для измерения силы тока.

Таким образом, кроме измерения намагниченности образца, предусматривается возможность определения напряженности намагничивающего поля. Последняя вычисляется по постоянной намагничивающей катушки и силе тока в ее обмотке.

2. Измерения

С целью испытания осуществленной нами магнитоотрицательной измерительной установки на ней были проведены измерения магнитоотрицательности образцов никеля и железа.

Перед измерениями необходимо было прежде всего провести испытание и градуировку измерительных узлов установки. Градуировка

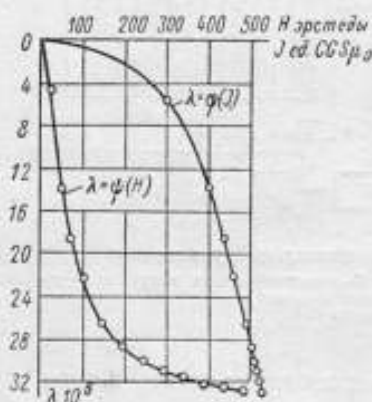


Рис. 6. Кривые магнитоотрицательности образца никеля.

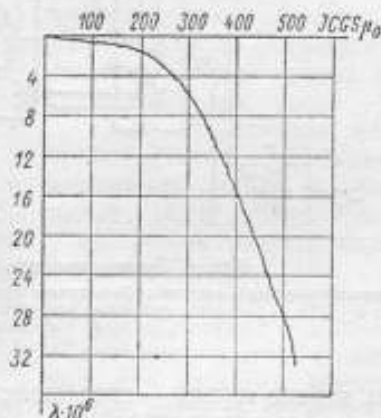


Рис. 7. Кривая магнитоотрицательности образца никеля, полученная посредством фотографической записи.

магнитоотрицательного измерителя производилась посредством оптиметра на мерной скамье с микрометрическим передвижением вертикальной площадки, имеющей контакт с наконечником оптиметра и агатовым наконечником рычага измерителя. Поворот зеркала измерителя наблюдался по шкале, удаленной от зеркала на то же расстояние 1500 мм, на котором находятся шкала и зеркало в измерительной установке.

Градуировка магнитометра, т. е. определение его постоянной, производилась при помощи катушки Гельмгольца (рис. 1, поз. 15).

Пропуская по обмоткам катушки ток определенной силы, наблюдаем отклонение магнитометра. Постоянная магнитометра в единицах напряженности магнитного поля вычислялась по формуле

$$C_n = \frac{0,45 \frac{w}{r} I}{\beta}, \quad (3)$$

где w — число витков катушки;
 r — радиус катушки;
 I — сила тока в обмотке;
 β — отклонение магнитометра.

Постоянная же магнитометра в единицах магнитного момента определялась из выражения

$$C_m = C_n \frac{R^2}{2 \left(1 + \frac{0,3l^2 - 0,5n^2}{R^2} \right)}, \quad (4)$$

где R — расстояние между центрами образца и нижнего магнита магнитометра;

l — длина образца;

n — длина магнита.

Опытная градуировка измерительных элементов установки дала следующие результаты:

1. Постоянная магнитоотрицательного измерителя в значениях магнитоотрицательности для образца длиной 100 мм — $\lambda_0 = 2,1 \cdot 10^{-7}$ на один миллиметр шкалы.

2. Постоянная магнитометра $C_m = 2,76$ единиц CGS μ на один миллиметр шкалы.

Анализ результатов градуировки магнитоотрицательного измерителя и магнитометра, а также результатов многократных измерений магнитоотрицательности образцов никеля показывает, что погрешности измерений магнитоотрицательности находятся в пределах $\pm 10\%$, погрешности же измерения намагниченности — порядка $\pm 3\%$.

В качестве примера на рис. 6 приведены данные одновременного измерения кривых магнитоотрицательности образца никеля в зависимости от намагниченности $\lambda = \varphi(J)$ и в зависимости от напряженности намагничивающего поля $\lambda = \psi(H)$.

На рис. 7 приводится кривая магнитоотрицательности λ , в функции намагниченности образца J , записанная на фотографическую бумагу.

Результаты исследования магнитоотрицательной измерительной установки подтвердили правильность предложенной нами методики измерений.

В заключение автор считает своим долгом отметить участие в работе В. И. Лейкума, выполнившего конструктивную разработку измерительных устройств.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ МЕТОДОМ ВЗВЕШИВАНИЯ

Работа является продолжением исследований Магнитной лаборатории ВНИИМ по определению магнитной восприимчивости парамагнитных материалов [1, 2, 3] проводившихся в 1940—1951 гг.

Этими исследованиями установлено, что наиболее целесообразным для измерения удельной магнитной восприимчивости материалов, лежащей в пределах от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ ед. $CGSm_o$, является весовой метод „однородного“ магнитного поля.¹

Настоящая статья имеет целью рассмотрение основных причин и путей устранения систематических погрешностей, присущих методу взвешивания.

В методе однородного поля применяются образцы в форме длинной призмы или цилиндра постоянного поперечного сечения с плоскими основаниями, одно из которых находится в сильном поле H на оси между полюсами электромагнита, а другое в очень слабом поле H_o вне полюсов.

Удельная магнитная восприимчивость с учетом поправки на восприимчивость среды, окружающей образец (например, воздуха), рассчитывается по формуле

$$\chi = \chi_o \frac{D_o}{D} + \frac{2mg}{SD(H^2 - H_o^2)},$$

где χ_o , D_o — удельная магнитная восприимчивость и плотность окружающей среды (воздуха);

D — плотность образца;

m — разность масс гирь, уравнивающих образец без поля и в поле;

g — ускорение силы тяжести.

Следовательно, погрешность определения χ зависит от погрешностей измерения величин H , H_o , m , g , S и D , если считать, что значение χ_o свободно от погрешности.

Задачей настоящей работы и является анализ погрешности определения каждой из этих величин.

1. Погрешность измерения напряженности поля H

Существенным вопросом методики рассматриваемых измерений является обеспечение однородности магнитного поля H .

¹ Термин метод „однородного“ магнитного поля является условным, так как в действительности имеет место изменение напряженности поля по вертикальной оси.

Исследование различных форм полюсных наконечников показало, что полюсные наконечники с плоскопараллельными плоскостями (рис. 1, кривая 2) лучше всего удовлетворяют поставленному требованию. В этом случае в центральной части поле изменяется незначительно и на расстоянии 2 мм от центра напряженность его отличается всего лишь на 0,1% по сравнению с напряженностью в центре.

Погрешность ΔH определения напряженности магнитного поля H является суммой целого ряда отдельных погрешностей:

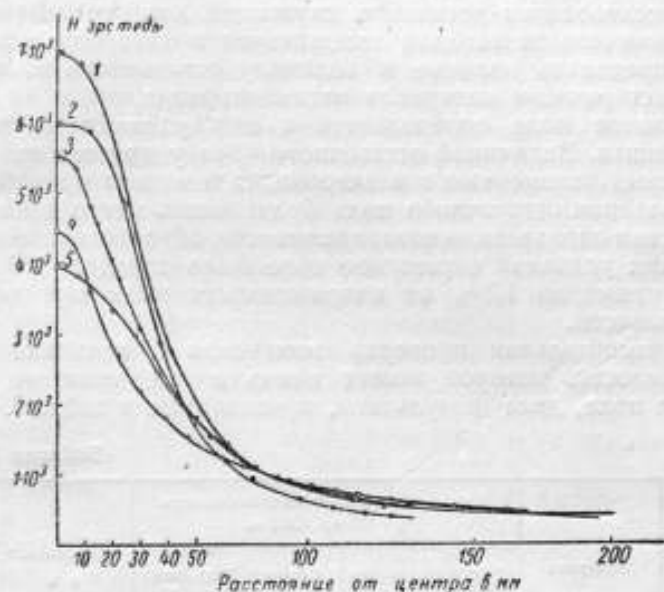


Рис. 1. Кривые распределения напряженности поля по вертикальной оси симметрии междуполюсного пространства при различных по форме полюсных наконечниках:

1—цилиндрические наконечники $\varnothing 40$ мм, $R=20$ мм; 2—цилиндрические наконечники $\varnothing 60$ мм, $R=25$ мм; 3—цилиндрический $\varnothing 40$ мм и конусный наконечники; 4—конусные наконечники $R=27$ мм; 5—цилиндрический $\varnothing 60$ мм и конусный наконечники $R=33,5$ мм.

- δ_1 — погрешности, обусловленной неоднородностью поля в междуполюсном пространстве электромагнита;
- δ_2 — погрешности, обусловленной изменением температуры;
- δ_3 — погрешности, вызываемой колебаниями силы тока;
- δ_4 — погрешности, обусловленной гистерезисом материала магнитопровода;
- δ_5 — погрешности, обусловленной несовпадением центра основания образца с центром междуполюсного пространства электромагнита.

Для получения количественных значений отдельных погрешностей рассмотрим их подробнее в отдельности.

Согласно рис. 1, при смещении из центра междуполюсного пространства по вертикальной оси на 2 мм изменение напряженности поля составляет 0,1%. В действительности же при измерениях напряженности поля возможно смещение, не превышающее 0,5 мм, и, следовательно, и изменение напряженности поля будет меньше 0,1% (рис. 1, кривая 2).

Неравномерность поля по горизонтальной оси для тех же перемещений лежит в пределах $0,1 \rightarrow 0,2\%$ и, следовательно, максимальное значение погрешности $\delta_1 = 0,3\%$.

Температурный коэффициент индукции материала магнитопровода электромагнита из наблюдений оказался равным $0,02\%$ на 1°C и, следовательно, погрешность δ_2 должна иметь ту же величину.

Погрешность, вызываемая колебаниями силы тока, соответствующей напряженности поля в воздушном зазоре порядка $10\,000 \text{ э}$, при поддержании постоянства его с помощью компенсатора составит $0,03\%$.

При исследовании установки, служащей для определения магнитной восприимчивости методом взвешивания в однородном поле, необходимо определить наличие и величину остаточного поля, обусловленного гистерезисом материала магнитопровода.

Остаточное поле определяется в междуполюсном пространстве электромагнита. Величиной остаточного поля у другого конца образца вне полюсных наконечников электромагнита можно пренебречь.

При наличии остаточного поля будет иметь место дополнительная погрешность в определении восприимчивости, обусловленная этим полем.

В наших условиях остаточное поле было порядка 130 э , что составляло примерно $1,3\%$ от напряженности поля при определении восприимчивости.

Экспериментальная проверка изменения в величине магнитной восприимчивости, которое может иметь место, если не учитывать остаточное поле, дала результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6 \text{ ед. COS } \rho_0$		Расхождение в %
	Образец подвешен верхним основанием в центре Ток $I = 0$	Образец подвешен значительно ниже центра Ток $I = 0$	
Алюминий	$0,50_3$	$0,51_6$	0,9
Плексиглас	$-0,54_2$	$-0,54_2$	0,7
Гетинакс	$-0,22_4$	$-0,22_3$	2,2
	$H_{\text{ост}} = 130 \text{ э}$	$H_{\text{ост}} = 1 \text{ э}$	

Поэтому для исключения погрешности в определении восприимчивости, вызванной наличием остаточного поля, можно либо измерять в каждом случае остаточное поле и вводить поправку, либо при выключенном поле взвешивать образец, помещая его верхнее основание ниже центра, где остаточное поле практически равно нулю.

Второй путь исключения влияния остаточного поля более верен, так как в этом случае определяется действительный вес образца и не входит дополнительная погрешность измерения напряженности поля. В нашей работе при определении восприимчивости исследуемых материалов влияние остаточного поля исключалось вторым путем и, следовательно, можно было считать $\delta_4 = 0$.

Несовпадение центра основания образца с центром междуполюсного пространства электромагнита при взвешивании образца в магнитном поле может привести к дополнительной погрешности в определе-

нии восприимчивости за счет неправильного измерения напряженности поля.

Практически несовпадение центра основания образца с центром междуполюсного пространства может составить величину, не превышающую 0,5 мм.

При измерении в сильных магнитных полях погрешность определения напряженности поля при этом несовпадении центров не будет превышать 0,1%.

С другой стороны, при несовпадении центра верхнего основания образца с центром междуполюсного пространства возможна значительная ошибка из-за неправильного определения величины силы, действующей на образец. В нашем случае эта погрешность была незначительна вследствие того, что поле в центральной части междуполюсного пространства однородно (рис. 1, кривая 2), так же однородно поле и у второго основания образца. При незначительном смещении от центра градиент вблизи от центра междуполюсного пространства мал, а сила, действующая на образец, определяется суммой сил, действующих по его длине. В центре у верхнего основания образца сила равна нулю и возрастает постепенно по мере удаления от центра. Так как в расчетную формулу для определения магнитной восприимчивости входят значения напряженности поля у обоих оснований образца, то при незначительном смещении от центра заметного изменения силы не произойдет.

Суммируя рассмотренные нами случайные и систематические погрешности, имеющие место при измерении напряженности магнитного поля, мы получим погрешность для измерения напряженности поля в пределах 0,5–0,6%.

В формулу для вычисления удельной магнитной восприимчивости входит сечение образца и его плотность.

Погрешность определения сечения образца различна для твердых образцов и образцов из сыпучих материалов или жидкостей.

При измерении линейных размеров твердого образца, не прибегая к использованию сложных или особо точных методов, можно легко добиться погрешности в 0,1%.

При испытании сыпучих или жидких веществ рекомендуется определять сечение у отметки измерительной трубки в середине по ее длине (что соответствует верхнему основанию образца) путем взвешивания трубки, наполненной какой-либо тяжелой жидкостью (например, ртутью), первоначально немного выше отметки, а затем немного ниже отметки. Разность весов даст вес столбика ртути (или какой-либо другой жидкости), имеющего высоту, равную сумме расстояний от соответствующего уровня жидкости до отметки. Эти расстояния определяются при помощи пикнометра.

Погрешность измерения площади сечения таким методом характеризуется величиной $\pm 0,3\%$.

2. Погрешность определения силы, действующей на образец в магнитном поле

При определении магнитной восприимчивости путем взвешивания испытуемого образца в магнитном поле сила притяжения уравновешивается силой тяжести.

Величину силы притяжения $F = mg$ характеризует разность масс гирь m , уравновешивающих образец без поля и в поле, причем $m = M_0 - M$,

где M_0 — масса гирь при взвешивании образца без поля;
 M — масса гирь при взвешивании образца в поле.

Очевидно, что погрешность определения силы притяжения прежде всего зависит от погрешности взвешивания.

Точность взвешивания в магнитном поле зависит от ряда причин, каждая из которых является источником определенной погрешности.

Можно считать, что погрешность определения силы является суммой следующих погрешностей: весовых погрешностей, определяемых чувствительностью и вариацией весов, δ_1 ; погрешности, обусловленной ошибками в определении массы гирь, δ_2 ; погрешности, зависящей от соотношения плотности гирь и испытуемого образца, δ_3 ; погрешности, зависящей от притяжения или отталкивания магнитным полем гирь и элементов весов, расположенных несимметрично в магнитном поле, δ_4 ; погрешности, обусловленной магнитными свойствами материала гирь, δ_5 .

Рассмотрим отдельно каждую из перечисленных погрешностей.

По проведенным в работе исследованиям было установлено, что при многократном взвешивании одного и того же груза вариация показаний весов составляла при взвешивании без поля 0,1 мг, а при взвешивании в поле 0,3 мг.

Относительная погрешность взвешивания при этом определяется как

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta M_0 + \Delta M}{M_0 - M} \cdot 100\%.$$

При испытании материалов, имеющих удельную магнитную восприимчивость $0,1 \cdot 10^{-6} - 1,0 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{P_0} , величина m лежит в пределах от 1,0 до 10 мг в зависимости от веса испытуемого образца и напряженности магнитного поля.

Для образцов с магнитной восприимчивостью порядка $(50 - 100) \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{P_0} изменение массы m при тех же условиях составляло 50—100 мг.

Погрешность определения величины m при этом можно оценить величиной порядка 1—5% в первом случае и 0,5—1,0% для второй группы материалов.

При разностном методе погрешность вследствие разности объемов гирь и образца равна нулю, независимо от того, одинаковы или различны по величине плотности гирь и образца при условии, что плотность воздуха постоянна в процессе измерения. В дальнейшем будем считать погрешность, вызываемую поправкой на разность объемов взвешиваемого тела и гирь равной нулю, так как взвешивание образца производится сначала без поля, а затем в магнитном поле, и в подсчет восприимчивости входит разность весов.

Для оценки влияния магнитного поля на результат взвешивания за счет магнитной несимметрии конструкции весов нами было проверено положение равновесия весов (отклонения в делениях по микрошкале) без поля и при наличии сильного поля в междуполюсном пространстве электромагнита (порядка 10 000 э). На основании проведенных исследований установлено, что непостоянство положения равновесия в делениях составляло без поля $\pm 0,2_s$, а при поле $\pm 0,3_s$; это указывает на пренебрегаемо малое влияние магнитного поля на положение равновесия весов. Таким образом, можно принять $\delta_4 = 0$.

Для обнаружения влияния магнитных свойств материала гири на измеряемую величину силы, действующей на образец в магнитном поле, было проведено взвешивание одного и того же образца золота в одинаковых условиях, но при уравнивании его гирями из материалов, имеющих заведомо различную магнитную восприимчивость: хрусталя, платины и бронзы. При этом были получены следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2

Материал гири	Удельная магнитная восприимчивость материала гири $\chi \cdot 10^6$ ед. CGS _{гс}	Измеренное значение удельной магнитной восприимчивости образца золота $\chi \cdot 10^6$ ед. CGS _{гс}
Хрусталь (горный кварц)	-0,46	-0,141
Платина	+0,10	-0,138
Бронза	порядка +3÷+5	-0,133

Приведенные данные говорят о том, что имеет место влияние магнитных свойств материала гири на получаемое значение восприимчивости.

В Магнитной лаборатории ВНИИМ при определении магнитной восприимчивости пара- и диамагнитных материалов используются гири из горного кварца.

Погрешностью, вызванной неодинаковым нагревом плеч весов, можно пренебречь, так как она составляет меньше 0,2%.

Суммируя рассмотренные нами погрешности, имеющие место при определении величины m , получим как наибольшую относительную погрешность определения разности масс, характеризующей силу, действующую на образец, $\frac{\Delta m}{m} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5$, так как $\delta_1 = 1,0-5,0\%$; $\delta_2 = 0$; $\delta_3 = 0$; $\delta_4 = 0$; $\delta_5 = 1,0 \pm 0,1\%$, то окончательно получаем $\frac{\Delta m}{m} = 2,0 \pm 6,0\%$ при определении восприимчивости порядка $0,1 \cdot 10^{-6} \pm 1,0 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{гс}.

При испытании парамагнитных материалов с удельной магнитной восприимчивостью порядка $50 \cdot 10^{-6} \pm 100 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{гс} наибольшая относительная погрешность $\frac{\Delta m}{m}$ оказывается равной 0,6÷1,1%.

Условия получения наименьшей погрешности при определении магнитной восприимчивости. Абсолютный метод определения магнитной восприимчивости основан на измерениях отдельных величин, входящих в формулу для вычисления магнитной восприимчивости

$$\chi = \frac{2mg}{SD(H^2 - H_0^2)}$$

Поэтому вероятная погрешность определения восприимчивости должна определяться как средняя квадратичная погрешность косвенных измерений

$$\frac{\Delta \chi}{\chi} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \frac{4H^2(\Delta H)^2}{(H^2 - H_0^2)^2} + 4 \left[\frac{(\Delta H_0) \cdot H_0}{H^2 - H_0^2}\right]^2 + \frac{4}{H^2} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial I}\right) \Delta I\right]^2 + (\Delta \mu \cdot \Delta t)^2}$$

- где $\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta M_0 + \Delta M}{M_0 - M} \cdot 100$ — погрешность, обусловленная вариацией весов, равная $\frac{0,0002}{M_0 - M} \cdot 100$ в процентах при вариации 0,02 мг;
- $\frac{\Delta S}{S}$ — погрешность определения сечения образца, равная 0,1% для твердых тел и 0,3% для сыпучих;
- $\frac{\Delta H}{H} = 0,5\%$ — погрешность измерения напряженности магнитного поля;
- $\frac{\Delta D}{D}$ — погрешность определения плотности образцов, принята соответственно равной 0,1% для твердых и 0,3% для сыпучих материалов;
- $\Delta \mu \cdot \Delta t$ — поправка, обусловленная температурным коэффициентом магнитной восприимчивости парамагнитных тел. При $\Delta t = 2^\circ \text{C}$ это составит около 0,0074¹;
- $\frac{2}{H} \left(\frac{\partial H}{\partial I} \right) \Delta I$ — погрешность, обусловленная колебаниями силы тока, составит 0,03%.

Для выявления условий, обеспечивающих получение наименьшей погрешности измерения восприимчивости, были вычислены средние квадратичные погрешности при указанных выше значениях отдельных относительных погрешностей, принятых постоянными.

Вычисления средних квадратичных погрешностей были сделаны для образцов, имеющих размеры: длина 100 мм, диаметр 5 мм; длина 100 мм, диаметр 7 мм; длина 65 мм, диаметр 3,5 мм.

Затем были построены кривые вычисленной средней квадратичной погрешности от одного из основных параметров при постоянном значении остальных, а именно: 1) зависимости средней квадратичной погрешности от величины магнитной восприимчивости при некотором постоянном значении плотности образца и напряженности поля, в котором испытывается образец; 2) от плотности, при постоянном значении напряженности поля и для различных значений удельной магнитной восприимчивости; 3) от напряженности поля, при некотором определенном значении плотности образца, и для различных значений удельной магнитной восприимчивости.

На рис. 2, 3, 4 приведены зависимости средней квадратичной погрешности от перечисленных выше параметров для образца длиной 100 мм, диаметром 7 мм.

Для иллюстрации влияния размеров образца на точность измерения восприимчивости при прочих одинаковых условиях на рис. 5 приведены кривые зависимости средней квадратичной погрешности от удельной магнитной восприимчивости при напряженности магнитного поля $H \approx \text{const} = 10\,000$ э и постоянной плотности образца, равной $5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Как видно из рис. 5, влияние размеров особенно существ-

¹ Коэффициент μ , равно как и соображения по его определению, можно найти в статье Б. М. Яновского [2].

венно при малых значениях удельной магнитной восприимчивости от $0,1 \div 1,0 \cdot 10^{-6}$ ед. $CGS\mu_0$.

Из приведенных на рис. 2, 3, 4, 5 зависимостей средней квадратичной погрешности от величины удельной магнитной восприимчи-

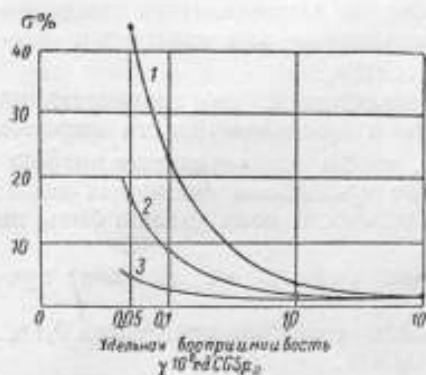


Рис. 2. Зависимость средней квадратичной погрешности от удельной магнитной восприимчивости при $D = \text{const} = 0,5 \text{ г/см}^3$ при значениях напряженности магнитного поля 3000, 5000 и 10 000 э:

1— $H=3000$ э; 2— $H=5000$ э; 3— $H=10\,000$ э.



Рис. 3. Зависимость средней квадратичной погрешности от удельной магнитной восприимчивости при постоянном значении плотности $D=2 \text{ г/см}^3$ и при значениях напряженности магнитного поля 3000, 5000, 10 000 э:

1— $H=3000$ э; 2— $H=5000$ э; 3— $H=10\,000$ э.

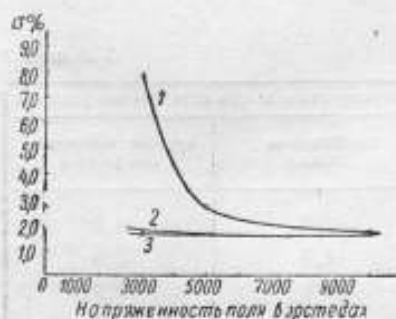


Рис. 4. Зависимости средней квадратичной погрешности напряженности магнитного поля при постоянном значении плотности образца $D = 2 \text{ г/см}^3$ и трех значениях удельной магнитной восприимчивости:

1— $\chi = 0,1 \cdot 10^{-6} CGS\mu_0$; 2— $\chi = 1,0 \cdot 10^{-6} CGS\mu_0$; 3— $\chi = 10 \cdot 10^{-6} CGS\mu_0$.

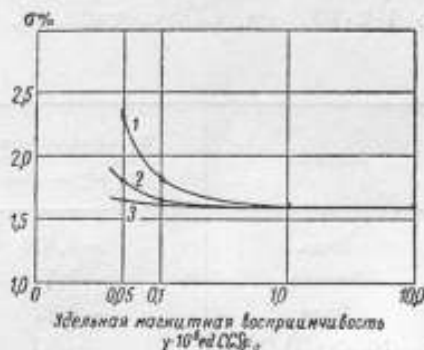


Рис. 5. Зависимости средней квадратичной погрешности от удельной магнитной восприимчивости при постоянном значении напряженности поля $H=10\,000$ э и постоянном значении плотности $D=5 \text{ г/см}^3$ для образцов различных размеров:

1— $\varnothing=65$ мм, $\varnothing=3,5$ мм; 2— $\varnothing=100$ мм, $\varnothing=5$ мм; 3— $\varnothing=100$ мм, $\varnothing=7$ мм.

вости, напряженности магнитного поля и плотности образца вытекает, что для получения наименьшей погрешности необходимо выполнение следующих условий:

1. При определении удельной магнитной восприимчивости порядка $0,1 \cdot 10^{-6} \div 1,0 \cdot 10^{-6}$ ед. $CGS\mu_0$ необходимо иметь поля напряженностью порядка 20 000 э.

2. При испытании материалов, величина удельной магнитной восприимчивости которых имеет порядок $(10-100) \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} и выше, практически достаточно иметь поля напряженностью порядка 10 000 э.

При прочих равных условиях погрешность будет наименьшей при максимально возможном весе образца (определяется пределом для нагрузки весов), что особенно существенно при измерении восприимчивости порядка $(0,1-1,0) \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} .

Для получения относительной погрешности, не превышающей 1% при измерениях удельной магнитной восприимчивости порядка $(0,1-1,0) \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} , необходимо, чтобы относительные погрешности определения отдельных величин не превышали указанных ниже:

1. Погрешность определения напряженности поля должна быть не выше 0,2%.

2. Погрешность измерения сечения образца не должна превышать 0,1%.

3. Погрешность определения плотности не должна превышать 0,1%.

4. Колебание силы тока не выше 0,04%.

5. Изменение температуры в процессе измерения не должно превышать $\pm 0,1^\circ C$.

6. Напряженность поля должна быть порядка 20 000 э.

7. Погрешность взвешивания не должна превышать 0,2%, что соответствует вариации весов 0,02 мг при полной нагрузке 20 г.

При обеспечении перечисленных условий возможны следующие погрешности измерения удельной магнитной восприимчивости ряда материалов, восприимчивость которых лежит в пределах от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} (табл. 3).

Таблица 3

Материал	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ ед. CGS_{μ_0}	Погрешность в % при оптимальных условиях	
		наибольшая (около)	средняя квадратичная (около)
Медь	-0,086	1,2	0,6
Золото	-0,140	1,3	0,6
Вода	-0,72	1,2	0,6
$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	+16,1	1,2	0,6
NiO	+53,7	1,0	0,5
CoF_2	+84,0	1,0	0,5
MnF_2	+122,8	1,0	0,5

Подводя итоги, можно установить, что точность определения удельной магнитной восприимчивости различна в зависимости от величины удельной магнитной восприимчивости и характеризуется наибольшей погрешностью:

6,0-5,0% при значениях удельной магнитной восприимчивости, лежащих в пределах от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $1,0 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} ; 5,0-3,0% при значениях удельной магнитной восприимчивости, лежащих в пределах от $1,0 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} ; 3,0-2,0% при значениях удельной

магнитной восприимчивости, лежащих в пределах от $10 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} ; 2,0—1,0% при значениях удельной магнитной восприимчивости, больших $100 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS_{μ_0} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Яновский Б. М. и Спиридович Н. И., Сб. трудов ВНИИМ, вып. 1 (43), 1940, стр. 5.
2. Яновский Б. М., Труды ВНИИМ, вып. 1 (56), Машгиз, 1947, стр. 34.
3. Соколова Е. А., Труды ВНИИМ, вып. 10 (70), Машгиз, 1952, стр. 110.

Е. А. СОКОЛОВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ХИМИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КАДМИЯ, СУРЬМЫ, СЕРЫ И НЕКОТОРЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Имеющиеся в литературных источниках и справочных изданиях большие расхождения в значениях магнитной восприимчивости как для чистых веществ, так и для технических материалов, неизбежно выдвигают требования пересмотра и новых определений магнитной восприимчивости.

Существенным недостатком почти всех таблиц, и даже наиболее фундаментальных из них, является почти полное отсутствие сведений о составе (чистоте) и технологии материалов, для которых приводятся значения магнитной восприимчивости.

Магнитной лабораторией ВНИИМ уже проводилась работа по определению магнитной восприимчивости химически чистых металлов [1].

В настоящей статье приводятся результаты определения магнитной восприимчивости химически чистых сурьмы, кадмия, серы и некоторых технических материалов, имеющих широкое применение в отечественной приборостроительной промышленности.

Для изготовления образцов сурьмы металл был расплавлен в графитовом тигле в тигельной электрической печи сопротивления, после чего были отлиты цилиндрические образцы в графитовой изложнице.

Образцы имели следующие размеры: длина $74,5 \pm 0,1$ мм, диаметр $4,16 \pm 0,01$ мм.

Образцы кадмия были изготовлены также путем плавления металла в графитовом тигле в тигельной электрической печи сопротив-

Таблица 1

Название металла	Химический состав в %	№ образца	Удельная ¹ магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ ед. CGSP ₂₀	Плотность в г/см ³
Сурьма	Fe — 0,003	1	—0,73 ₅	6,98 ₂
	Cu — 0,008	2	—0,73 ₉	6,98 ₂
Кадмий	Fe — 0,002	1	—0,18 ₁	8,61 ₂
	Cu — 0,01	2	—0,18 ₂	8,61 ₂

¹ По литературным данным, значения удельной магнитной восприимчивости сурьмы лежат в пределах (от $-0,64$ до $-0,92$) $\cdot 10^{-6}$ ед. CGSP₂₀, а значения удельной магнитной восприимчивости кадмия в пределах (от $-0,17$ до $-0,183$) $\cdot 10^{-6}$ ед. CGSP₂₀.

ления без применения флюса, после чего была произведена отливка цилиндрических образцов в графитовую изложницу. После обработки на токарном станке образцы были обработаны куском стекла с острыми гранями для удаления верхних слоев металла. Образцы применялись длиной $108,4 \pm 0,1$ мм, диаметром $4,04 \pm 0,01$ мм.

В табл. 1 приведены результаты определения удельной магнитной восприимчивости при напряженности магнитного поля $H = 5200$ э химически чистых металлов сурьмы и кадмия и химический состав образцов.

Удельная магнитная восприимчивость серы определялась для образца, имевшего по данным завода-изготовителя следующие свойства:

Строение	Кристаллическое
Цвет	Светложелтый
Содержание серы	99,5%
Запах водорода	Отсутствует
Зола	0,013%
Песок в золе	Отсутствует
Содержание мышьяка	0,021%
Удельный вес	2,015
Кислотность	Отсутствует

Сера испытывалась весовым методом в виде мелких кристаллов (порошок). Удельная магнитная восприимчивость серы получена равной $-0,48 \cdot 10^{-6}$ ед. GSC_{Fe} , при плотности наполнения образца, равной $1,29_6$ г/см³.

Из технических материалов были исследованы те, которые применяются в приборостроении и на большинство из которых имеются общесоюзные стандарты. Для сопоставления исследовались образцы цветных металлов и сплавов одной и той же марки, но полученные от разных заводов.

Были произведены определения восприимчивости трех сортов латуни марок ЛС59-1, Л68 и Л62, трех сортов бронзы БрОФ 6,5-0,4, БрБ2 и марганцевистой бронзы особого состава, изготовленной Лабораторией спечсплавов ВНИИМ.

Из цветных металлов исследовались несколько образцов алюминия, олова, цинка и два образца ртути.

Для проведения испытаний из перечисленных выше материалов (кроме ртути) были изготовлены образцы длиной $100,0 \pm 0,1$ мм. Часть образцов была изготовлена в форме цилиндров различных диаметров от 3 до 6 мм, а часть — в форме призм прямоугольного сечения от 3×3 мм² до 4×4 мм².

Все образцы для удаления возможных ферромагнитных загрязнений обрабатывались инструментом из немагнитного материала. Для этого применялись резцы, изготовленные из прутков кованого вольфрама путем заточки его на абразивных кругах. После обточки образцы были подвергнуты травлению: образцы алюминия травились в 10-процентном растворе едкого натра, насыщенного поваренной солью.

Образцы латуни, бронзы, независимо от марки, травились в растворе, имеющем следующий состав: 1 л HNO_3 + 1 л H_2SO_4 + 15 г NaCl + 20 г сосновой сажи. Образцы цинка и олова травились в слабом растворе соляной кислоты.

По содержанию железа испытанные образцы латуней не выходят за пределы, допустимые ГОСТ 1019—47, согласно которому латуни указанных выше марок должны иметь следующий химический состав (табл. 2).

Таблица 2¹

Марка сплава	Основные компоненты в %			Примесей не более, в %				
	Медь	Цинк	Свинец	Железо	Сурьма	Висмут	Фосфор	Всего примесей
ЛС59-1	57—60	Остальное	0,8—1,9	0,5	0,01	0,003	0,02	0,75
Л68	67—70	Остальное	0,03	0,10	0,05	0,002	0,01	0,30
Л62	60,5—63,5	Остальное	0,08	0,15	0,005	0,002	0,01	0,05

¹ Таблица представляет выписку из ГОСТ 1019—47.

Результаты измерения магнитной восприимчивости трех марок латуни отечественного производства с указанием химического состава испытанных образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Марка сплава ГОСТ 1019—47	Химический состав (%) по данным заводов-изготовителей	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ ед. CGS ₉₆	Плотность образца в г/см ³	Напряженность магнитного поля в эрстедах
ЛС59-1	Fe — 0,1	16,4 ± 0,2	8,40	1500
	Fe — 0,1	15,0 ± 0,1	8,40	1500
ЛС59-1	Cu — 57,18 Fe — 0,1 Pb — 0,98	80,8 ± 59,5 имеет зависимость от напряженности поля	8,40	760—1900
Л68	Cu — 68,20 Fe — 0,1 Pb — 0,002	0,94 ± 0,14	8,60	9800
Л68	Тот же	0,88 ± 0,005	8,60	9800
Л62	Cu — 61,9 Fe — 0,01 Pb — 0,006	— 0,075 ± 0,002	8,43	9800
	Тот же	— 0,100 ± 0,001	8,43	9800
	Тот же	— 0,114 ± 0,006	8,43	9800
	Тот же	— 0,117 ± 0,002	8,43	9800

Испытанию подвергались три марки бронзы: оловянно-фосфористая, бериллиевая и марганцовистая.

Первые две марки согласно ГОСТ должны иметь следующий химический состав (табл. 4).

Таблица 4¹

1. Оловянно-фосфористая бронза ОСТ 6240											
Марка сплава	Основные компоненты в %			Примесей не более, в %							
	Олово	Фосфор	Медь	Сури-ма	Желе-зо	Алю-миний	Крем-ний	Сера	Вис-мут	Свинец	Всего
БрОФ 6,5—0,4	6—7	0,3—0,4	Ос-таль-ное	0,002	0,02	0,002	0,02	0,002	0,002	0,02	0,05
2. Бериллиевая бронза ГОСТ 1789—42											
Марка сплава	Основные компо-ненты в %		Примесей не более, в %								
	Бериллий	Медь	Желе-зо	Фос-фор	Мар-ганец	Алю-миний	Никель	Крем-ний	Свинец	Вис-мут	Всего
БрБ2	2—2,3	Ос-таль-ное	0,4	0,02	0,05	0,25	0,5	0,15	0,002	0,002	1,2

¹ Таблица представляет выписки из ОСТ 6270 и ГОСТ 1789—42.

По данным завода, полученная оловянно-фосфористая бронза со-держала железа меньше 0,002%.

Марганцовистая бронза была получена от Лаборатории спецспла-вов ВНИИМ. Химический состав ее по данным лаборатории был сле-дующий: марганец — 7%, медь — 89,5%, железо — 0,5%, олово — 3%.

Результаты определения магнитной восприимчивости трех марок бронзы приведены в табл. 5.

Таблица 5

Марка сплава	Химический состав по данным завода-изготовителя в %	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ ед. CGSP ₀	Плотность в г/см ³	Напряжен-ность магнит-ного поля в эрстедах
БрОФ 6,5—0,4	Железо — 0,002	$-0,066 \pm 0,001$	8,85	9800
	То же самое	$-0,071 \pm 0,001$	8,92	9800
БрБ2		$39,2 \pm 0,2$	8,23	1500
БрМц	Mn — 7,0 Cu — 89,5 Fe — 0,5 Sn — 3,0	$18,3 \pm 0,1$	8,40	800

Результаты определения удельной магнитной восприимчивости алюминия, цинка, олова и ртути приведены в табл. 6. Там же указан химический состав по ОСТ и действительное содержание железа в процентах.

Таблица 6

Название и марка материала	Химический состав по ОСТ в %	Содержание железа в %	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ ед. $COSp_0$	Плотность в $г/см^3$	Напряженность магнитного поля в эрстедах
Олово 01 (ГОСТ 860—41)	Sn — 99,90	Fe — 0,04	$0,035 \pm 0,002$	7,25	9800
	As — 0,015				
	Fe — 0,009				
	Cu — 0,01				
	Pb — 0,04				
	Bi — 0,01				
	Sb — 0,15				
	S — 0,01				
Цинк Ц1 (ГОСТ 3640—47)	Zn — 99,94	Fe — 0,002	$-0,120 \pm 0,003$	7,07	9800
	Pb — 0,025				
	Fe — 0,015				
	Cd — 0,014				
	Cu — 0,0002				
	Sn — 0,001				
Алюминий А1 (ГОСТ 3549—47)	Al — 99,5	Fe — 0,25	$0,61 \pm 0,006$	2,70	9800
	Fe — 0,3				
	Si — 0,3				
	Cu — 0,015				
	Всего примесей 0,5 Тот же	Fe — 0,25	$0,62 \pm 0,001$	2,70	9800
Ртуть ареометрической лаборатории ВНИИМ Ртуть лаборатории завода «Светлана»	Состав не известен	—	$-0,182 \pm 0,001$	13,546	9800
	»		$-0,172 \pm 0,001$	13,546	9800

Помимо указанных определений были проведены измерения магнитной восприимчивости некоторых образцов-изолирующих материалов: гетинакса, плексигласа, дуба, плавленого кварца и фарфора.

Образцы для испытаний были изготовлены размерами: длина $100 \pm 0,1$ мм, диаметры от 3 до 6 мм. Образцы были обточены вольфрамовым резцом. Дополнительно никакой обработке не подвергались.

Результаты определения магнитной восприимчивости этих материалов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Название материала	№ образца	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ ед. СГСЭ _в	Плотность в г/см ³	Напряженность магнитного поля в эрстедах
Гетинакс	1	$-0,23 \pm 0,01$	1,15	9800
	2	$-0,15 \pm 0,01$	1,15	9800
	3	$-0,65 \pm 0,01$	1,15	9800
	4	$-0,54 \pm 0,01$	1,15	9800
Плексиглас	1	$-0,64 \pm 0,006$	1,20	9800
	2	$-0,20 \pm 0,003$	1,31	9800
	3	$-0,59 \pm 0,001$	1,15	9800
	4	$-0,51 \pm 0,001$	1,30	9800
Кварц (плавленый)	1	$-0,38 \pm 0,005$	2,20	9800
	2	$-0,36 \pm 0,005$	2,20	9800
Дуб	1	$-0,41 \pm 0,02$	0,75	9800
	2	$-0,47 \pm 0,02$	0,75	9800
Фарфор	1	0,38	2,4	8800

Выводы

Полученные в работе значения удельной магнитной восприимчивости для химически чистых сурьмы, кадмия и серы отечественного изготовления подтверждают данные, имеющиеся в литературе, и являются первыми, характеризующими названные химически чистые вещества, имеющие определенный химический состав.

Результаты определения магнитной восприимчивости ряда технических материалов отечественного изготовления, имеющих широкое применение в приборостроительной промышленности, могут служить справочным материалом при решении конкретных задач, связанных с расчетом конструктивных узлов, содержащих слабомагнитные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколова Е. А., Труды ВНИИМ, вып. 10(70), Машгиз, 1952, стр. 110.

СОДЕРЖАНИЕ

К. К. Аглинцев. О погрешности результатов измерений	5
М. С. Калидер. Погрешности амперметров и вольтметров электромагнитной и электродинамической систем при повышенной частоте	8
К. П. Широков. Комплектная установка для поверки амперметров и вольтметров при повышенной частоте переменного тока	24
А. Я. Безикович. Термоэлектрический метод поверки ваттметров на переменном токе нормальной и повышенной частоты	57
Г. К. Ягода. Ваттметровая установка для измерения потерь в образцах малой массы	72
К. П. Широков. О поправках к показаниям некоторых типов компенсаторов постоянного тока	77
К. П. Широков. Прибор для точного уравнивания двойного моста	94
Г. К. Ягода. Методика измерения магнитоотрицания	105
Е. А. Соколова. Исследование некоторых источников погрешностей, определяющих точность измерения магнитной восприимчивости методом взвешивания	112
Е. А. Соколова. Определение магнитной восприимчивости химически чистых кадмия, сурьмы, серы и некоторых технических материалов	122

Технический редактор *Л. В. Соколова*

Корректор *Е. С. Кушлю*

Сдано в набор 25/V 1954 г. Подписано к печати 23/IX 1954 г. М-46570. Формат бумаги 70 × 108²/₁₆. Печ. листов 10,96. Уч.-изд. листов 9,0. Тираж 600 экз. Заказ 1283

Типография № 2 Ленгорполиграфиздата, Ленинград, Социалистическая, 14

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
26	15-я сверху	[6,7]	[7]	Ред.
26	18-я сверху	[8]	[7]	.
40	6-я снизу	[11]	[10]	.
40	3-я снизу	защитных	защищаемых	Авт.
64	4-я сверху	$\delta_p = \frac{\Delta \cdot A \cdot I^2 - I_m^2}{4 P_n} + \frac{\Delta}{4A} \frac{U^2 - U_m^2}{P_n} - 0,9x_1 \sigma_{x_1+1}$	$\delta_p = \frac{U_m^2 - U^2}{P_n} (1 + A \Delta_0)$.
80	7-я снизу	$-0,9x_1 \sigma_{x_1+1}$	$-0,9x_2 \sigma_{x_2+1}$.
100	11-я сверху	$\left(\frac{1}{R_B + r_B} \right) \Delta R_A$	$\left(\frac{1}{R_B + r_B} \right) \Delta R_A$.
100	15-я снизу	$\frac{\Delta R_A}{R_A} <$	$\frac{\Delta R_B}{R_B} <$.
114	5-я сверху	0,02%	-0,02%	Ред.
119	Подпись к рис. 4	погрешности напряженности	погрешности от напряженности	Авт.
122	Табл. 1, 1-я графа справа	8,61 _e	8,61 _e	Корр.
125	Табл. 4, сноски	ОСТ 6270	ОСТ 6240	Авт.

СОДЕРЖАНИЕ

ни

во

пе

ма

тог

опр

ши

чис

Техни

Сланс

бумаги 70 × 108^{1/16} Печ. листов 10,96. Уч.-изд. листов 9,0. Тираж 600 экз. Заказ 1283

Типография № 2 Ленгорполиграфиздата, Ленинград, Социалистическая, 14





