

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT
ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Г. А. МЕТС, К. Я. ШУЛЬЦ и Л. А. ЮУЛЬ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ

II

ТАЛЛИН, 1960

1/147569

Г. А. МЕТС, К. Я. ШУЛЬЦ и Л. А. ЮУЛЬ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ

II

TALINNA POLITEHNILINE INSTITUUT
TÄÄRHOON-TEKNIIKKA-OSASTO

E. A. METC. R. B. WYBELL & J. A. JOYCE

РАБОТАЮЩИЕ РАБОТЫ ИЛИ ФОНДЫ

II

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

147569

ARHIIVKOGU

TALINNA 1900

О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ

Вследствие несовершенства измерительных приборов, которыми мы пользуемся, и несовершенства наших органов чувств, мы можем производить все измерения только с известной степенью точности. Поэтому результаты измерений дают нам не истинное значение измеряемой величины, а лишь приближенное. Если, например, вес тела определен с точностью до 0,1 мГ, то это значит, что найденный вес отличается от истинного веса тела менее, чем на 0,1 мГ.

Точность измерения определяется той наименьшей частью единицы меры, до которой с уверенностью в правильности результата можно произвести измерение. Степень точности измерений зависит от употребляемых при измерениях приборов и общих методов измерений, и было бы совершенно напрасной тратой времени стремиться при измерениях в данных условиях перейти за этот предел точности. Обыкновенно приходится довольствоваться точностью в 0,1% измеряемой величины. В некоторых случаях можно достичь значительно большей точности; так, на хороших весах, взвешивая тело весом около 200 Г, нетрудно достичь точности до 0,1 мГ, т. е. точности до 0,00005%. В других же случаях получить точность в 0,1% является почти недостижимым; таковы, например, обычные измерения температуры при помощи термометров: обыкновенными термометрами можно отсчитать температуру с точностью лишь до $0,1^\circ$, иногда с точностью до $0,05^\circ$; если, например, измеряемое изменение температуры порядка 10° , то степень точности не будет превышать 1% измеряемой величины.

Отсюда следует, что прежде, чем приступить к измерениям, необходимо предварительно определить пределы точности, которые могут быть получены с данными приборами. Это достигается внимательным изучением приборов, определением точности каждого из них в отдельности и общей точности данного метода измерений. Если приходится в задаче измерять различные величины и пределы возможной точности оказываются для каждой измеряемой величины различными, то нет оснований при отдельных измерениях выходить далеко за пределы точности наименее точно определяемой величины. Например, при калориметрических измерениях определение массы воды и ка-

лориметра взвешиванием можно было бы сделать с точностью, как уже сказано, около 0,0001%; однако в данном случае нет оснований производить взвешивание с такой точностью, и можно ограничиться взвешиванием на менее совершенных весах с точностью, например, до 0,1%, так как измерение изменений температуры калориметра может быть сделано, как сказано, с точностью лишь 1—2%.

Погрешность измерения обусловлена обыкновенно весьма многими причинами. Если эти причины влияют на величину результата в определенном направлении, то погрешности, обусловленные такими причинами, называем систематическими. Если эту причину мы знаем, и знаем, как она влияет на результат измерения (например влияние температуры при точном измерении длин), то мы можем эту ошибку исключить последующим вычислением.

Но имеется очень много причин, влияющих на результат измерения, влияние которых не поддается учету. Часто такие причины изменяют результат измерения то в одном, то в другом направлении. Поэтому, чтобы получить представление о величине влияния таких причин на результат измерения, измерение повторяют несколько раз. Разницу между максимальным и минимальным результатом можно рассматривать как максимальную ошибку, которая является одной характеристикой точности измерений.

Однако вошло в обычай считать, что отклонения результатов измерения от истинного значения, обусловленные такими причинами, распределяются по законам случайностей. Исходя из этого предположения, на основании полученных результатов вычисляют «вероятное» значение измеряемой величины, вероятную ошибку и т. д.

Если бы закон случайного распределения в действительности выполнялся точно, то на основании сколь угодно большого числа не очень точных измерений можно было бы вычислить измеряемую величину со сколь угодно большой точностью.

Надо заметить, что такая «вера» в математику к сожалению распространена среди многих математиков и даже физиков. Практика показывает, что такая вера ничем не оправдывается. Большое количество измерений увеличивает в некоторой степени «вероятность» вычисленного результата, но ни в коем случае его точности.

Теория вероятности дает возможность подсчитать вероятную погрешность среднего результата по отклонениям отдельных измерений от этого среднего. В курсе теории вероятностей можно подробно познакомиться с этим вопросом. (см. по этому

вопросу книгу К. П. Яковлева, Математическая обработка результатов наблюдений, Гостехиздат, М. Л. 1950). Наша цель — дать ряд практических указаний, необходимых хотя бы для приближенного определения точности полученного результата, т. е. для определения на основании нескольких повторных измерений погрешности среднего результата.

Пусть, например, N_1, N_2, \dots, N_k будут результаты отдельных измерений; здесь k есть число отдельных измерений. Мы можем искать такое «среднее» значение N , чтобы сумма квадратов отклонений от величины N была бы наименьшей, т. е.

$$\sum_1^k (N - N_i)^2 = \min.$$

Решение этого уравнения дает

$$N = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_k}{k} \quad (1)$$

Отклонения ΔN_i каждого отдельного измерения от этого среднего, т. е. величины $N - N_1 = \pm \Delta N_1$, $N - N_2 = \pm \Delta N_2, \dots$, носят название абсолютных ошибок отдельных измерений. Нас интересует не знак этих ошибок, а лишь их численное значение.

Среднее арифметическое абсолютных значений отдельных ошибок, которые обозначим ΔN — называют средней абсолютной ошибкой результата;

$$\Delta N = \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_k}{k} \quad (2)$$

Отношения $\frac{\Delta N_1}{N_1}, \frac{\Delta N_2}{N_2}$ называют относительными ошибками отдельных измерений. И, наконец, отношение средней абсолютной ошибки ΔN к среднему значению измеряемой величины N называется средней относительной ошибкой результата (E):

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm E. \quad (3)$$

Относительные ошибки выражаются обычно в процентах.

Выше уже было сказано, что результат работы весьма редко может быть получен путем измерения одной только физической величины. В большинстве случаев для получения результата необходимо произвести ряд измерений и с полученными численными значениями измеряемых величин произвести различные математические вычисления. Зная погрешности, которые допу-

щены при измерении величин, входящих в результат, необходимо определить и погрешности самого результата.

Рассмотрим несколько основных примеров.

1. Абсолютная и относительная ошибки результата, являющегося суммой (или разностью) двух измеряемых величин; $N = A \pm B$.

Пусть абсолютная ошибка измерения величины A равна ΔA , а абсолютная ошибка измерения величины B есть ΔB . Тогда, очевидно,

$$N \pm \Delta N = (A \pm \Delta A) \pm (B \pm \Delta B).$$

Ошибки ΔA и ΔB могут быть любого знака, но их следует рассчитывать, рассматривая наиболее невыгодный случай. При измерении суммы двух величин A и B наибольшую ошибку мы получим, если ошибки измерения величин A и B будут одного знака; в случае измерения разности величин, — если их ошибки будут разного знака. В обоих случаях, следовательно, абсолютная ошибка ΔN измерений величины N будет равна сумме абсолютных ошибок¹ измерений величин A и B :

$$\pm \Delta N = \pm (\Delta A + \Delta B). \quad (4)$$

Относительные ошибки измерения будут выражаться следующими формулами:

$$\text{для суммы } E = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A + B}, \quad (5)$$

$$\text{для разности } E = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}. \quad (6)$$

Отсюда, если мы определяем какую-либо величину, равную разности двух величин, то относительная ошибка определения тем больше, чем ближе значения измеряемых величин.

2. Абсолютная и относительная ошибки произведения или частного двух величин; $N = AB$ или $N = \frac{A}{B}$.

Если A измерено с ошибкой $\pm \Delta A$, а B — с ошибкой $\pm \Delta B$, очевидно,

$$\begin{aligned} (N \pm \Delta N) &= (A \pm \Delta A) \cdot (B \pm \Delta B) = \\ &= AB \pm A\Delta B \pm B\Delta A \pm \Delta A\Delta B. \end{aligned}$$

¹ Таким образом вычисленную ошибку результата часто называют предельной ошибкой.

Величиной $\Delta A \Delta B$ можно пренебречь, так как ΔA и ΔB по сравнению с величинами A и B малы; поэтому

$$\Delta N = A\Delta B + B\Delta A. \quad (7)$$

Мы опять рассматриваем наиболее невыгодный случай, когда обе ошибки имеют одинаковый знак. Таким образом абсолютная ошибка произведения равна сумме произведений абсолютной ошибки первого множителя на второй множитель и ошибки второго множителя на первый. Отсюда

$$E = \frac{\Delta N}{N} = \frac{A\Delta B + B\Delta A}{AB} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}. \quad (8)$$

Относительная ошибка произведения равна сумме относительных ошибок множителей.

Аналогично, если $N = \frac{A}{B}$, то

$$N \pm \Delta N = \frac{A \pm \Delta A}{B \pm \Delta B} = \frac{(A \pm \Delta A)(B \pm \Delta B)}{B^2 - (\Delta B)^2} = \frac{AB \pm \Delta AB \pm \Delta BA}{B^2}.$$

Мы опять пренебрегаем квадратами и произведением ошибок и рассматриваем наиболее невыгодный случай, когда ошибки в измерении числителя и знаменателя сделаны с обратным знаком. Отсюда

$$\Delta N = \frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}. \quad (9)$$

Абсолютная ошибка частного равна сумме произведений абсолютной ошибки числителя на знаменатель и абсолютной ошибки знаменателя на числитель, деленной на квадрат знаменателя. Относительная ошибка частного, очевидно, равна сумме относительных ошибок делимого и делителя.

Действительно,

$$E = \frac{\Delta N}{N} = \frac{B}{A} \cdot \frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}. \quad (10)$$

Здесь следует иметь в виду, что автоматическое применение данных правил может привести к ошибке в тех случаях, когда измеряемая величина входит в формулу для вычисления результата несколько раз. Рассмотрим следующий пример. Пусть

$$N = \frac{A + B}{B}.$$

Можно, автоматически пользуясь приведенными формулами, рассматривать N как частное от деления двух величин: $C = A + B$ и B .

Тогда

$$\Delta N = \frac{B\Delta C + C\Delta B}{B^2},$$

но

$$\Delta C = \Delta A + \Delta B,$$

откуда

$$\Delta N = \frac{B(\Delta A + \Delta B) + (A + B)\Delta B}{B^2} = \frac{B\Delta A + (A + 2B)\Delta B}{B^2}.$$

С другой стороны очевидно, что $\Delta N = \frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}$, так как N может быть представлено как $N = \frac{A}{B} + 1$.

Ошибка, сделанная нами при первом способе подсчета, произошла потому, что мы считали знаки абсолютной ошибки измерения, повторяющейся в формуле величины B в знаменателе и числителе, различными, аналогично тому, как мы поступали при вычислении ошибки для частного от двух независимо измеренных величин. В данном же случае абсолютную ошибку ΔB в числителе и знаменателе, очевидно, надо брать с одинаковым знаком. Учтя это, мы и при первом способе подсчета пришли бы к правильному результату.

Таким образом, в случае повторения некоторой величины в формулах несколько раз следует в каждом данном случае специально вычислить ошибку результата. Общий метод вычисления с помощью дифференциального исчисления, не требующий рассмотрения отдельных случаев, будет изложен ниже.

Так как ошибки измерения достаточно малы, чтобы пренебречь квадратами их величин, то можно для вычисления ошибок измерения пользоваться дифференциальным исчислением, что значительно упрощает подсчет ошибки для сложных функций. При этом не возникает уже никаких затруднений с повторяющимися в формуле величинами.

Пусть, например, для измерения искомой величины N , которую не удастся определить непосредственно, пришлось измерить некоторую другую величину x , связанную с первой функциональной зависимостью:

$$N = f(x). \quad (11)$$

Пусть, далее, средняя абсолютная ошибка измерения величины x есть $\pm dx$; эта ошибка вызовет соответствующую ошибку в искомой величине $\pm dN$. Очевидно

$$N \pm dN = f(x \pm dx). \quad (12)$$

Разлагая правую часть равенства (12) в ряд Тейлора, получим:

$$N \pm dN = f(x) \pm dx \frac{df(x)}{dx} \pm \frac{(dx)^2}{2!} \frac{d^2f(x)}{dx^2} \pm \dots$$

Пренебрегая членами разложения, содержащим dx в степени выше первой, получим

$$N \pm dN = f(x) \pm \frac{df(x)}{dx} dx$$

или, принимая во внимание равенство (11),

$$dN = \pm dx \frac{df(x)}{dx}, \quad (13)$$

т. е. абсолютная ошибка функции равна абсолютной ошибке аргумента, умноженной на производную этой функции.

Относительная ошибка измерения определится из выражения

$$E = \pm \frac{\Delta N}{N}$$

или

$$E = \pm \frac{dx}{f(x)} \frac{df(x)}{dx}. \quad (14)$$

Обработка результатов измерений. Когда все измерения, необходимые для данной задачи, закончены, предстоит сделать на основании их вычисление искомой величины. Обыкновенно в результате измерений бывает необходимо ввести различного рода поправки, которые зависят от температуры, внешнего давления, иногда от некоторых систематических ошибок в показаниях прибора и т. д. (вообще говоря, они бывают невелики сравнительно со всей измеряемой величиной). Поправки на температуру и давление обыкновенно даются в таблицах; некоторые из них приложены в конце руководства. Другие поправки и исправления наблюдаемых величин вычисляются по формулам, которые также приводятся в руководстве, когда это необходимо. Для сокращения времени поправочные члены, как малые, следует вычислять приближенно или по правилам сокращенных арифметических действий, или при помощи логарифмической линейки, или, в более редких случаях, с помощью четырехзначных таблиц логарифмов.

Когда все поправки введены в отдельные измерения, присту-

пают к вычислению искомой величины по формулам, приведенным в описании задач.

Производя вычисления на основании результатов измерений, нет никакого смысла вести вычисления дальше того предела точности, который обеспечивается точностью определения непосредственно измерявшихся величин.

Точность измерения определяет поэтому и те способы, с помощью которых следует вести те или иные вычисления. В ряде случаев достаточно пользоваться логарифмической линейкой, в других — надо пользоваться таблицами логарифмов. Опять-таки в зависимости от точности измерения иногда вполне достаточны четырехзначные таблицы логарифмов, иногда же следует использовать пяти- или семизначные. Рекомендуется также, где возможно, пользоваться различными вспомогательными таблицами.

Пусть, например, определяя ускорения силы тяжести, после внимательного изучения имевшихся в нашем распоряжении приборов и на основании произведенных нами измерений и изложенных выше указаний, мы установили, что относительная ошибка конечного результата при применявшемся нами методе равна 0,2%. В этом случае абсолютная ошибка результата будет равна 2 см/сек². Совершенно очевидно, что вычислять результат с точностью до тысячных совершенно бесполезно, так как ошибка содержится уже в целых единицах и все дальнейшие знаки являются излишними. Определить следующий за последним знак (в данном примере первый десятичный) полезно только потому, что принято, отбрасывая ненужные цифры, увеличивать последнюю значащую цифру на единицу, если отбрасываемая больше 5. В данном случае результат измерений следует записать так: $g = 982$ см/сек². Если же мы захотели бы указать точность наших измерений, то мы могли бы указать предельную ошибку нашего результата и в таком случае записать этот результат так:

$$g = 982 \pm 2 \text{ см/сек}^2.$$

Если одна и та же искомая величина определялась многократно, то на основании теории вероятности можно дать следующие характеристики для точности измерений. Если для величины N в интервале значений от $N_0 - \Delta N_{\infty}$ до $N_0 + \Delta N_{\infty}$ лежит 50% всех экспериментально полученных значений N , то ΔN_{∞} называется вероятной погрешностью. И говорят, что истинное значение с вероятностью 0,5 лежит в указанных пределах.

Не давая выводов и отсылая интересующихся к курсам тео-

рии вероятностей, приводим только конечную формулу вероятной ошибки ΔN_{∞} :

$$\Delta N_{\infty} = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta N)^2}{n(n-1)}}, \quad (15)$$

где $\Sigma(\Delta N)^2$ есть сумма квадратов абсолютных ошибок отдельных измерений искомой величины, а n есть число произведенных измерений.

В этом случае окончательный результат измерений записывается так:

$$N = N_0 \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta N)^2}{n(n-1)}}, \quad (16)$$

где N_0 есть среднее арифметическое из всех полученных результатов.

Следует иметь в виду, что последняя формула имеет смысл лишь при очень большом числе измерений n .

ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

1. **Задание.** Получить данные и вычертить график зависимости сопротивления нити лампы накаливания для двух данных ламп.

2. **Приборы и принадлежности.** Две лампы накаливания (получить от ассистента), гнездо для ламп, реостат — потенциометр, амперметр, вольтметр и соединительные провода.

3. **Общие сведения.** Омическое сопротивление проводников (металлов) увеличивается с повышением температуры. Наоборот, сопротивление полупроводников, например, угля, с повышением температуры уменьшается.

Кривая, изображающая сопротивление нити лампочки накаливания в зависимости от температуры, называется характеристикой лампочки накаливания. Однако измерение температуры нити сложная процедура. Поэтому омическое сопротивление нити определяется не в зависимости от температуры, а в зависимости от силы тока, проходящего через нить, так как с повышением силы тока повышается и температура проводника (при неизменных условиях отвода тепла). Целью данной работы и является определение зависимости омического сопротивления нити лампочки накаливания от силы тока, проходящего через нить, и представление этой зависимости в виде графика.

4. **Выполнение работы.** Для определения зависимости омического сопротивления лампы накаливания от силы тока составим цепь (рис. 1.) из лампы L , амперметра A и реостата R , который включён по схеме потенциометра.

В потенциометрическую схему любой реостат включить нельзя. Сопротивление реостата должно быть таким, чтобы подаваемое на него напряжение не вызвало бы тока больше допустимого. Допустимый ток реостата должен быть больше, чем холостой ток потенциометра плюс ток нагрузки!

Параллельно лампе включаем вольтметр V . Передвижением ползунка потенциометра R можем изменять напряжение на клеммах лампы.

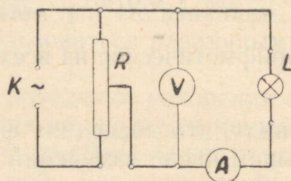


Рис. 1

Протокол работы снабдить схемой соединений. Сопротивление нити в омах определяется по закону Ома: $R = \frac{U}{I}$,

где U напряжение в вольтах, а I — сила тока в амперах.

С каждой лампочкой производятся измерения в 10-ти точках с разными значениями силы тока и напряжения.

Результаты измерений заносим в следующую таблицу

№№	Лампа с металлической нитью					Лампа с угольной нитью				
	U		I		R ом	U		I		R ом
	отсчет	вольты	отсчет	амперы		отсчет	вольты	отсчет	амперы	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Измерения проделать на лампочках с угольной и с металлической нитью.

Полученные результаты измерений наносим на графики

$$U = f(I) \text{ и } R = f(I).$$

Лампочка накаливания состоит из откаченного до высокого вакуума или наполненного инертным газом стеклянного баллончика, в котором заключена тонкая нить накаливания из тугоплавкого металла. При пропускании достаточно сильного тока через нить последняя накаливается до белого свечения. При этом большая часть потребляемой энергии тока отводится в виде тепла и только малая доля превращается в энергию видимого света (1—5%). Это отношение изменяется в пользу видимого света тем более, чем выше температура нити.

Поэтому эти нити изготавливаются из весьма тугоплавких металлов, как напр. осмий (плавится при 2700°C), тантал (2880°C) и особенно вольфрам (3400°C).

Практически вольфрамовую нить в высоковакуумной лампочке удается накалить только до 2200°C (в вакууме), так как при более высокой температуре начинается сильная взгонка нити (поэтому старые долгогоревшие лампочки изнутри покрыты тонким слоем металла, вследствие чего они плохо пропускают свет).

Для устранения этого явления в новейшее время лампочка наполняется инертным газом, который не реагирует химически с металлической нитью при высоких температурах и в то же время является плохим проводником тепла. К таким газам принадлежат напр. азот, аргон и особенно криптон. В инертном газе можно накалить вольфрамовую нить до 2700°C . Сама нить свернута в тонкую спираль, что уменьшает взгонку, а также отвод тепла.

Первую лампочку накаливания построил русский изобретатель Ладугин (1873).

Для ширпотреба ее обработал американский изобретатель Эдисон (1879).

Зависимость омического сопротивления проводника от температуры первым показал русский физик Ленц (1844).

Контрольные вопросы.

1. Каково было бы графическое изображение функции $R=f(I)$, если температура не влияла бы на сопротивление?

2. Что может случиться с предохранителями при включении лампочки с металлической нитью, потребляющей большую мощность, если сила тока в цепи уже до того была близка к предельной для плавящихся предохранителей?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КИПЯТИЛЬНИКА

1. Задание. 1) Определите графики нагревания кипятивльни-ка: а) для трех напряжений: 130 в, 180 в и 220 в, при одном и том же количестве воды или б) при постоянном напряжении с разными количествами воды.

2) Найти зависимость дифференциального кпд. от температуры нагревания.

3) Найти зависимость среднего кпд. от напряжения или от количества нагреваемой воды.

2. Приборы и принадлежности. Электрический нагреватель, амперметр, вольтметр, мензурка, провода, термометр, часы.

3. Выполнение работы. Спросите у ассистента уточненное задание.

Отмерьте мензуркой из крана m см³ воды и измерьте ее температуру (начальная температура).

Составьте измерительную цепь согласно данной здесь схеме (рис. 2). При этом следует иметь в виду, что амперметр включается **последовательно**, а вольтметр — **параллельно** нагрузке (кипятивльнику).

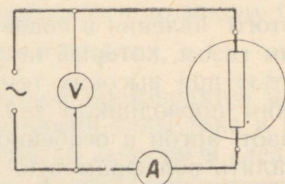


Рис. 2

Когда соединения электрического кипятивльни-ка проконтро-лированы ассистентом и все в порядке, отметьте начальную температуру воды в кипятивльнике и время момента включения тока и затем в течении всего опыта ежеминутно отмечайте показания амперметра, вольтметра и температуру.

Продолжайте наблюдения до тех пор, пока температура воды в кипятивльнике не поднимается до 95°.

Опыт повторяем три раза — при разных напряжениях или соответственно при разных количествах воды.

1) На основании полученной таблицы строим график за-висимости температуры от времени.

Результаты наблюдений занесите в таблицу:

Время τ	Напряжение U	Сила тока I	Температура $t^{\circ}\text{C}$
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
.			
.			

2) По закону Джоуля-Ленца затраченная электрическая энергия выражается:

$$\Delta A = 0,24IU\Delta t,$$

а полезное тепло:

$$\Delta Q = mc\Delta t,$$

где m — масса воды, Δt — изменение температуры, c удельная теплоемкость воды ($=1$).

Дифференциальный КПД будет:

$$\eta = \frac{\Delta Q}{\Delta A}.$$

Вычисляем η для отдельных температур (например 60 — 63°C) и заносим на график (соответственно средней температуре $61,5^{\circ}\text{C}$). (см. рис. 3)

Получаем три кривых (соответственно трем напряжениям или трем разным количеством воды).

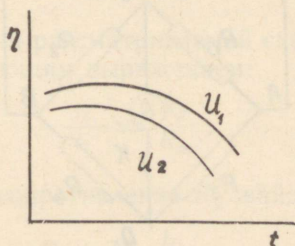


Рис. 3

Вычисляем средний КПД для соответствующих напряжений или количеств воды:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{mc(t_k - t_n)}{0,24/U\tau}$$

Постарайтесь выяснить, чему учат полученные результаты.

Примечание: При повторении опыта кипятильник необходимо остудить — налить его холодной водой, подержать 1—2 мин. и вылить.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МОСТИКОМ УИТСТОНА

1. **Задание.** Составить схему мостика Уитстона и измерить величину данных ассистентом сопротивлений.

2. **Приборы и принадлежности.** а) Калиброванная проволока, натянутая на шкале с подвижным контактом, б) измеряемые сопротивления, в) нулевой гальванометр, г) магазин сопротивлений, д) источник тока (2—4 в), е) контактный ключ, ж) соединительные провода.

3. **Теоретические сведения.** Одним из самых распространенных методов определения сопротивления есть метод, основанный на применении так называемой схемы мостика Уитстона.

Эта схема состоит из 4-х сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , соединенных, как указано на рис. 4.

К точкам A и B присоединяется источник тока E ; между точками C и D включается чувствительный гальванометр G .

Если подобрать сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , так, чтобы в ветви мостика CD отсутствовал ток (гальванометр G показы-

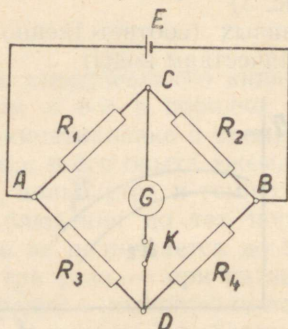


Рис. 4

вал 0), то из соотношения между сопротивлениями для этого случая можно вычислить одно из них, если три других известны.

Действительно, когда в ветви CD отсутствует ток, то силы токов в ветвях AC и CB , а также AD и DB попарно одинаковы. Обозначив силу тока в ACB через I_1 а в ADB через I_2 мы можем к контурам ACD и DCB применить второй закон Кирхгофа.

А именно:

$$I_1 R_1 - I_2 R_3 = 0 \quad I_1 R_2 - I_2 R_4 = 0.$$

Отсюда:

$$I_1 R_1 = I_2 R_3 \quad I_1 R_2 = I_2 R_4.$$

Деля почленно первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (1)$$

По этой формуле, зная три сопротивления, введенные в цепь, можно найти четвертое.

Рабочая схема мостика Уитстона изображена на рис. 5. Здесь E источник тока (аккумулятор). ACB — ветвь мостика в виде тонкой калиброванной проволоки длиной в 1 метр, натянутой на линейку. Вдоль этой проволоки передвигается скользящий контакт C , снабженный клеммой, к которой присоединяется провод от гальванометра G . K — ключ для замыкания цепи на короткий промежуток времени; R_m — магазин сопротивления; R_x — неизвестное сопротивление.

В уравнении (1) при применении схемы рис. 5 сопротивлениями R_1 и R_2 будут служить участки AC и CB калиброванной проволоки. Так как проволока однородна и ее сечение по всей длине одинаково, то

$$R_2 = \rho \frac{l_1}{S} \quad R_1 = \rho \frac{l_2}{S},$$

откуда

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Таким образом для рассматриваемой схемы формула может быть заменена следующим выражением:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{R_x}{R_m}.$$

Отсюда искомое сопротивление R_x найдется так:

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l_2}. \quad (2)$$

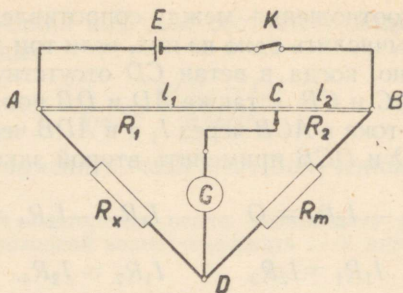


Рис. 5

4. Порядок выполнения работы.

- а) Соберите схему по рис. 5.
- б) Попросите преподавателя или лаборанта проверить схему.

Без проверки ток в схему не включать!

- в) Поставьте подвижной контакт C на середину линейки.

Примечание: метод мостика обладает наибольшей чувствительностью, когда плечи его (AC и CB) приблизительно равны, следовательно ошибка установки наименьшая.

- г) Включая на короткий промежуток времени ключ K подберите такое сопротивление магазина R_m , чтобы гальванометр G давал наименьшее отклонение.

Ключ K , пока мостик не уравновешен сколько-нибудь длительно, держать включенным нельзя, ибо иначе можно повредить гальванометр G .

- д) Передвигая подвижной контакт C и включая на короткий промежуток времени ключ K , найдите такое положение контакта, при котором гальванометр G не отклоняется.

- е) Запишите длины l_1 и l_2 плеч мостика и сопротивление магазина R_m , соответствующие отсутствию тока в гальванометре.

- ж) Повторите операции пп д) и е) с данным сопротивлением 5 раз, взяв разные сопротивления магазина, которые не отличались бы от величины найденного сопротивления больше чем на 10%.

- з) По данным каждого опыта вычислите сопротивление по формуле (2) и найдите среднее значение.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МОСТИКА ТОМСОНА

1. **Задание.** Определить удельное сопротивление проволоки (спросите проволоку у ассистента).

2. **Принадлежности:** а) двойной мостик Томсона, б) гальванометр, в) набор измеряемых сопротивлений, г) аккумулятор, д) масштаб, е) микрометр.

3. **Описание прибора.** Если при помощи мостика на постоянном токе измерять небольшие сопротивления, которые приближаются по величине к сопротивлениям подводящих проводников и контактов, то результат измерений, вычисленный по общей формуле мостика Уитсона, оказывается ошибочным, и ошибка будет тем больше, чем меньше измеряемое сопротивление по сравнению с сопротивлением подводящих проводов.

Для измерения малых сопротивлений, большое распространение получил способ измерения путем использования схемы, изображенной на рис. 6. Эта схема отличается от обычной схемы мостика тем, что один конец моста (гальванометр G) присоединен к добавочной цепи $NcdP$, в которой имеются два сопротивления c и d , больших по сравнению с R_0 и R_x . (R_x — измеряемое сопротивление и R_0 — известное сопротивление). Сопротивление A и B также велики по сравнению с R_0 и R_x . В такой схеме влияние сопротивления соединительных проводников и зажимов практически исключается.

Действительно, благодаря наличию значительных сопротивлений в цепях $MAcN$ и $PdBQ$ сила тока, ответвляемого в эти две цепи по сравнению с силой тока в R_0 и R_x мала. Поэтому

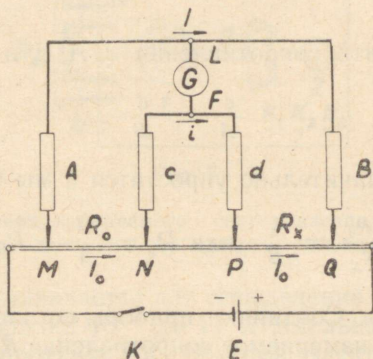


Рис. 6

падение напряжения на соединительных проводниках на всех участках мостика, т. е. на участках ML , LQ , NF и FP , мало по сравнению с падением напряжения как на сопротивлениях A , B , c , d , так и на R_0 и R_x ; следовательно, сопротивления соединительных проводников должны быть малы лишь в сравнении с c , d , и A , B , но не с R_x и R_0 .

Сопротивление R_0 представляет собой хорошо калиброванную проволоку, натянутую вдоль миллиметровой шкалы; длину используемого ее отрезка между точками M и N можно изменять с помощью подвижных контактов; сопротивление всей проволоки должно быть заранее точно известно. Неизвестные измеряемые сопротивления R_x представляют собой металлические стержни, которые вставляются в особые неподвижные зажимы, провода же от сопротивлений d и B подводятся к сопротивлению R_x при посредстве двух подвижных зажимов («ножей»).

Изменением сопротивлений A , B , c , и D , можно добиться того, что ток и в цепи гальванометра будет равен нулю; при этом токи в ветвях A и B , c и d , R_0 и R_x будут, очевидно, попарно равны: обозначим их I , i , I_0 .

По закону Кирхгофа имеем:

$$R_0 I_0 + ci = AI$$

$$R_x I_0 + di = BI$$

Отсюда

$$\frac{R_0}{R_x} = \frac{A}{B} \cdot \frac{I - \frac{c}{A} i}{I - \frac{d}{B} i}. \quad (1)$$

Если подобрать сопротивления c , A , d и B так, чтобы то

$$\frac{c}{A} = \frac{d}{B}.$$

уравнение (1) значительно упростится и мы будем иметь:

$$\frac{R_0}{R_x} = \frac{A}{B} \quad \text{или} \quad R_x = \frac{B}{A} \cdot R_0.$$

Измерения. Соединяют приборы согласно схеме, и поместив неизвестное измеряемое сопротивление R_x , в зажим между P и Q , вводят одинаковые сопротивления в ветвях A , и c , а

также в ветвях B и d . Одновременно изменяя A и c , можно при измерениях установить следующие отношения:

$$\frac{B}{A} = \frac{d}{c} = \frac{10}{10} \text{ или } = \frac{10}{100} \text{ или } = \frac{10}{1000}.$$

Для каждого из этих отношений подыскивают такие положения подвижных контактов на R_0 , чтобы стрелка гальванометра совершенно не отклонялась. Каждый раз записывают длину отрезка калиброванной проволоки, заключенную между контактами.

При измерениях, так же как при работе с обычным мостиком, цепь тока следует замыкать лишь на короткие промежутки времени.

Вычисления. Если сопротивление 1 см калиброванной проволоки обозначить r , а длину ее, заключенную между подвижными контактами, — l_0 , то окончательные вычисления нужно производить по формуле

$$R_x = \frac{B}{A} R_0 = \frac{B}{A} l_0 r.$$

У нас в лаборатории имеется готовый прибор, мост Томсона типа МТ-5, где вся схема смонтирована в ящике.

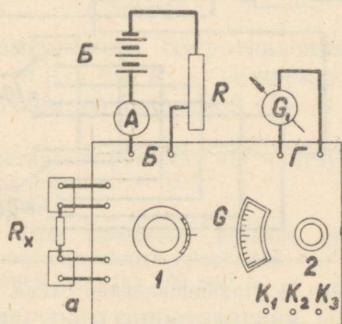


Рис. 7

Схема подключения измеряемого сопротивления, источника тока и внешнего (более чувствительного зеркального) гальванометра.

Аппарат предназначен для определения малых омических сопротивлений порядка 10^{-5} до 11Ω [удельные сопротивления проводников, сопротивления обмоток электрических машин, сопротивления обмоток трансформаторов и т. п.].

Таблица допустимых сил тока и диапазонов измерений

Сравнительное сопротивление в Ω включаемое рукояткой «1»	0,001	0,01	0,1	1	10	100
допустимая сила тока амп.	20	10	2	0,5	0,25	0,1
диапазон измерений						
$R \ \Omega$ от	0,00001	0,0001	0,001	0,01	1,1	1
до	0,00011	0,0011	0,011	0,11	0,1	11

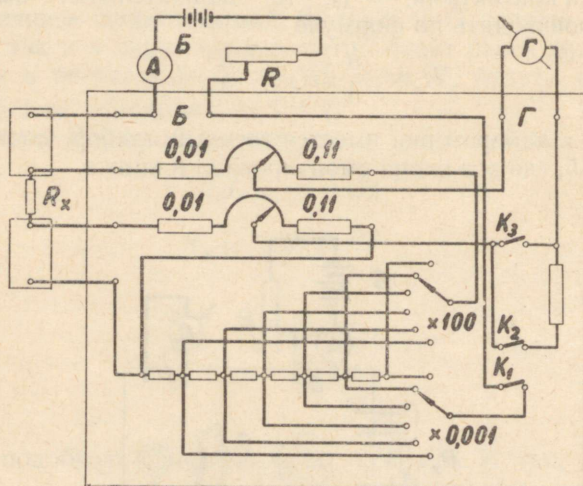


Рис. 8. Принципиальная схема.

Обозначения на схемах.

B — батарея кислотных или щелочных аккумуляторов напряжением около 4 V , емкостью от 40 до 60 A, ч. , R — реостат; выбираемый в зависимости от напряжения батареи, порядка измеряемого сопротивления и допустимой силы тока для измеряемого и сравнительного сопротивлений [см. таблицу]. A — амперметр, выбираемый в зависимости от допустимой силы тока в диапазоне измерений. G — стрелочный гальванометр нулевого типа, чувствительность которого порядка $10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{дел.}}$ при $R_{\text{внутр.}}$ от 50 до $200 \ \Omega$. R_x — измеряемое сопротивление.

4. Проведение измерений. 1. Установить рукоятку «1» (рис. 7) на сравнительное сопротивление, подобранное по таблице в зависимости от порядка измеряемого сопротивления.

2. Включить контакт « K_1 » (рис. 7) и установить реостатом R в цепи батареи ток, руководствуясь как приведенной выше таблицей, так и допустимым током для измеряемого сопротивления.

3. Включить контакт « K_2 » и вращением рукоятки «2» добиться отсутствия тока в цепи гальванометра.

4. Если отклонение от нуля стрелки гальванометра уменьшается, а равновесие схемы не наступает при подходе шкалы к 0,01, то рукоятку «1» перевести на ближайшую меньшую величину сравнительного сопротивления. Если же подобное явление наблюдается при подходе шкалы к 0,11, то, предварительно уменьшив силу тока в цепи батареи в пять раз, перевести рукоятку «1» на ближайшее большее сравнительное сопротивление. После этого окончательно установить в цепи батареи ток, руководствуясь как приведенной выше таблицей, так и допустимым током для измеряемого сопротивления, и вращением рукоятки «2» добиться отсутствия тока в цепи гальванометра.

5. Нажать контакт « K_3 » и вращением рукоятки «2» добиться полного равновесия схемы. (Действия рукояток «1» и «2» и контактов « K_1 », « K_2 » и « K_3 » разъясняет принципиальная схема (рис. 8).

6. Величина измеряемого сопротивления определяется по формуле: $R = R_0 \cdot m$ [Ω], где R_0 — величина сравнительного сопротивления, включаемого рукояткой «1», m — отсчет на шкале аппарата.

Пример. При установке рукоятки «1» на 0,01 равновесие схемы наступило при отсчете на шкале $m = 0,05$;
 $R_x = 0,01 \cdot 0,05 = 0,0005 \Omega$.

Примечание: При измерении величин сопротивлений, меньших 0,001 Ω , необходимо соединительный проводник «а» взять минимально возможной длины с сечением порядка 100 мм².

Определение удельного сопротивления. При помощи масштаба измеряют длину исследуемого стержня, а при помощи микрометра измеряют в нескольких местах его диаметр и берут среднее.

Удельное сопротивление ρ вычисляют по формуле:

$$R_x = \rho \frac{l}{S},$$

где R_x — измеренное сопротивление стержня,

l — его длина,

S — площадь поперечного сечения.

МЕГОММЕТР

1. **Задание.** Познакомиться с принципом действия и устройством мегомметра типа МОМ-3. Измерить изоляцию данного прибора (спросите у ассистента).

2. **Приборы и принадлежности.** а) Мегомметр МОМ-3, б) электрический прибор, сопротивления изоляции которого измеряется, в) соединительные провода.

3. **Назначение и технические характеристики.** Мегомметр МОМ-3 предназначен для измерения электрического сопротивления проводников и изоляторов в пределах от 100 ом до 10^4 мгом. Весь диапазон измеряемых сопротивлений перекрывается с помощью двух шкал и восьми пределов измерения:

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1. Ком \times 1 | |
| 2. Ком \times 10 | На шкале |
| 3. Ком \times 100 | «0 — ∞ ком» |
| 4. Мгом \times 1 | |
| 5. Мгом \times 10 | |
| 6. Мгом \times 100 | На шкале |
| 7. Мгом \times 1000 | « ∞ — 0,1 мгом» |
| 8. Мгом \times 10000 | |

Погрешность измерения в нормальных условиях на пределах ком \times 1, ком \times 10, мгом \times 1, мгом \times 10, мгом \times 100 и мгом \times 1000 не превышает $\pm 1,5\%$, а на пределах ком \times 100 и мгом \times 10000 $\pm 2,5\%$ от длины шкалы.

Мегомметр питается от сети переменного тока, 110, 127 или 220 в ($\pm 10\%$) частотой 45—55 гц.

Потребляемая мощность — 40 вт.

4. **Принцип работы и описание схемы.** Схема мегомметра МОМ-3 приведена на рис. 9. Принцип работы мегомметра заключается в следующем:

Измеряемое сопротивление подсоединяется к известному калиброванному сопротивлению, которые совместно образуют делитель напряжения, подключенный к стабилизированному источнику питания.

Ток, проходящий через делитель, в зависимости от величины подключенного сопротивления, создает на калиброванном сопротивлении делителя различное падение напряжения, которое подается на вход балансного усилителя и вызывает отклонение стрелки индикатора.

Схема мегомметра состоит из 3-х основных частей:

1. Питающее устройство

2. Усилитель постоянного тока
3. Входной делитель

1. Питающее устройство мегомметра состоит из трансформатора, выпрямителя, газоразрядного стабилизатора напряжения и баррета.

2. Усилитель постоянного тока собран на лампе 6НЗП по балансной схеме (Рис. 9, лампа Л₁).

3. Входной делитель мегомметра составляется из измеряемого сопротивления, подключенного между клеммами «Л» и «3», одного или двух калиброванных сопротивлений в зависимости от предела измерения. Мегомметр МОМ-3 имеет 6 калиброванных сопротивлений $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$, которые с помощью переключателя комбинируются в необходимом для измерения порядке.

При измерении на пределах «ком $\times 1$ » входной делитель составляется из сопротивлений R_x, R_3 и R_4 по схеме, приведенной на рис. 10.

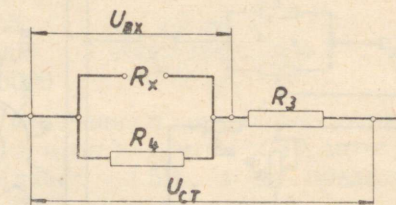


Рис. 10

При измерениях на пределах «ком $\times 10$ » и «ком $\times 100$ » входной делитель составляется по аналогичной схеме соответственно при помощи сопротивлений R_5 (10 ком), R_2 (1 мгом) и R_6 (100 ком), R_1 (10 мгом).

Сопротивление подключаемое параллельно измеряемому сопротивлению, соответственно в 100 раз меньше сопротивлений R_3, R_2, R_1 .

Таким образом при отсутствии измеряемого сопротивления на вход усилителя подается 1/101 часть стабилизированного напряжения, питающего делитель; при этом стрелка прибора отклоняется на всю шкалу, — следовательно, на килоомных пределах прибор можно калибровать, устанавливая стрелку прибора потенциометром R_{10} (см. рис. 9) точно на конец шкалы. (Регулировка потенциометра производится ручкой «МΩ»).

Для повышения точности калибровки сопротивления R_4 и R_3 работающие на пределе ком $\times 1$, изготовлены с точностью 0,2% из манганина. Производить калибровку прибора рекомендуется только на этом пределе.

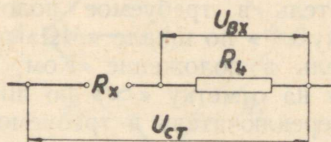


Рис. 11

При измерении на пределе мгом $\times 1$ входной делитель состоит из измеряемого сопротивления R_x и калиброванного сопротивления $R_4 = 1$ ком по схеме, приведенной на рис. 11.

При измерении на пределах мгом $\times 10$, мгом $\times 100$, мгом $\times 1000$ и мгом $\times 10000$ делитель состоит по аналогичной схеме, соответственно при помощи сопротивлений R_5 (10 ком), R_6 (100 ком), R_2 (1 мгом), R_1 (10 мгом). При отсутствии R_x вход усилителя замкнут соответственно через сопротивления R_4 , R_5 , R_6 , R_2 и R_1 и стрелка прибора не отклоняется. Отклонение стрелки на полную шкалу произойдет при значении R_x , превосходящем в 100 раз величину калиброванного сопротивления, соответствующую данному пределу.

5. Пользование прибором. Перед включением прибора в сеть необходимо установить переключатель сетевого напряжения на необходимое напряжение сети. Для этого необходимо вынуть предохранитель, оттянуть к себе колодку переключателя сети, повернуть ее так, чтобы в окошке показалась цифра с нужным номиналом напряжения (110, 127 или 220 в) и в таком положении вставить ее обратно.

Затем можно подключить кабель питания к сети и включить прибор.

После 10-минутного прогрева прибора можно приступить к измерениям.

При измерениях на килоомных пределах необходимо поставить переключатель в положение «Мгом $\times 1$ » и ручкой «М Ω » установить стрелку на отметку « ∞ » по шкале «М Ω ». (Ручкой «М Ω » перемещается движок потенциометра R_{10}). Затем нужно поставить переключатель в требуемое положение «Ком $\times 1$ », «Ком $\times 10$ » или «Ком $\times 100$ » и установить стрелку на отметку « ∞ » по шкале «К Ω » ручкой «К Ω ».

[Ручкой « $K\Omega$ » перемещается движок переменного сопротивления R_{16} (см. рис. 9).] После этого можно подключить измеряемое сопротивление и произвести измерение.

При измерениях на мегаомных пределах необходимо установить переключатель в требуемое положение, установить стрелку на отметку « ∞ » по шкале « $M\Omega$ » ручкой « $M\Omega$ », перевести переключатель в положение «Ком $\times 1$ » и ручкой « $K\Omega$ » установить стрелку на отметку « ∞ » по шкале « $K\Omega$ ». Затем вновь поставить переключатель в требуемое положение, подключить измеряемое сопротивление и произвести отсчет.

Примечание: При измерениях на мегаомных пределах установку прибора на отметку « ∞ » по шкале « $K\Omega$ » необходимо производить только при установке переключателя в положение «Ком $\times 1$ ».

Для большей уверенности в правильности калибровки установку стрелки на отметку « ∞ » рекомендуется повторить 2—3 раза.

При измерении сопротивлений изоляции конденсаторов большой емкости переключатель шкалы следует ставить сначала в положение « $M\Omega \times 1$ », чтобы уменьшить время заряда проверяемого конденсатора.

Необходимо следить за тем, чтобы прибор был чистым и сухим. В противном случае неизбежно увеличение погрешности измерений.

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. **Задание.** Измерить емкость конденсаторов малой емкости в параллельном и последовательном соединении при помощи измерителей емкости типа С-1 и С-2. Найти процентное расхождение между величиной ёмкости, помеченной на конденсаторе, и фактически измеренной величиной.

2. **Принадлежности.** Четыре конденсатора, измеритель ёмкости, источник тока звуковой частоты и провода.

3. **Теоретические сведения.** Мостик для измерения емкости представляет собой обыкновенную мостиковую схему, в которой вместо известного и неизвестного сопротивлений включены известная емкость C_n и неизвестная C_x (рис. 12). К точкам C и D подводится от какого-нибудь источника переменное напряжение звуковой частоты (от 500 до 200 гц), а к точкам A и B присоединяется телефон T , служащий указателем тока в мостике AB . Если сопротивления R_1 , R_2 и емкости C_x и C_n подобраны

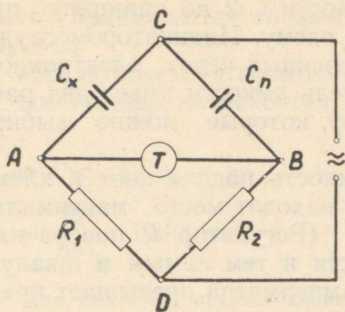


Рис. 12

так, что ток в мостике AB отсутствует, то для омических и емкостных сопротивлений можно записать соотношение:

$$\frac{1}{C_x \omega} : \frac{1}{C_p \omega} = R_1 : R_2,$$

где ω — угловая частота тока, которая сокращается и следовательно результат измерения не зависит от частоты применяемого тока.

Решив уравнение относительно C_x , получим:

$$C_x = C_p \cdot \frac{R_2}{R_1}.$$

Отношение $\frac{R_2}{R_1}$ является множителем предела измерения, которое меняется соответствующим переключателем.

Применяемый в настоящей работе измеритель емкости типа С-1 имеет подобное мостиковое устройство (смотрите схему на крышке прибора). Питая систему через указанный на схеме трансформатор переменным током звуковой частоты и присоединяя телефон к клеммам T , можно уравновесить мостик изменением емкости C_p . При равновесии громкость звука в телефоне минимальна. Отсчет делается прямо по шкале при учете множителя предела измерения.

Выбор подходящего предела измерения производят ступенчатым изменением сопротивлений R_1, R_2 при помощи рукоятки L . Переменное сопротивление R_δ (подключенное последовательно емкости C_p) необходимо для компенсации угла потерь конденсатора δ .

В нашем случае конденсаторы потерь не имеют и рукоятка « δ » должна находиться в крайнем правом положении.

Измеритель емкости С-2 по принципу представляет собой также мостиковую схему. Индикатором служит здесь миллиамперметр, подключенный через электронно-ламповый усилитель. Этот измеритель емкости имеет два рабочих предела: до 130 пф и до 600 пф, которые можно выбирать переключателем L_2 .

Измеряемую емкость подключают к клеммам K и вращением регулятора R находят место максимального отклонения миллиамперметра. (Регулятор R поворачивает конденсатор переменной емкости и тем самым и шкалу прибора). Если отклонение миллиамперметра превышает предел шкалы, то отброс миллиамперметра уменьшают рукояткой N . (Рукоятка N передвигает движок потенциометра, изменяя тем самым усиление). Маленькая рукоятка у левой стороны шкалы должна стоять так, чтобы красная метка на ней лежала бы в правой стороне.

Отсчет делается прямо по соответствующему пределу шкалы, причем для нахождения единичных, ближайшее к точке равновесия целое десятичное деление основной шкалы ставится к штриху и регулированием шкалы единичных рукояткой P (в верхней левой стороне прибора) находят максимальное отклонение стрелки. При этом надо учесть и знак единичных. (Рукоятка P служит для точной установки конденсатора переменной емкости).

4. **Выполнение измерений.** Данные емкости C_1, C_2, C_3 и C_4 соединяются по схемам а, б, в, г, д. (рис. 13). Какие именно схемы подлежат измерению, указывает ассистент. Во всех случаях величины емкостей измеряются сначала измерителем С-2,

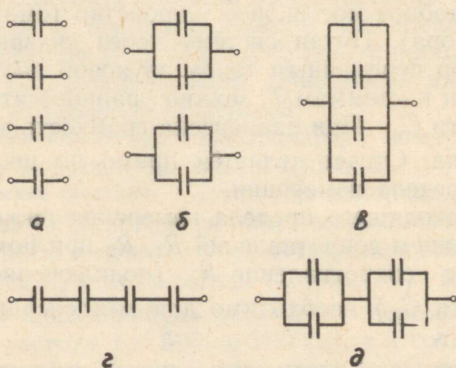


Рис. 13

результаты которого принимаются за фактические значения емкостей C_1, C_2, C_3 и C_4 .

Затем находят абсолютные и относительные ошибки номинальных значений, помеченных на емкостях, и также показаний измерителя $C-1$.

$$\text{Абс.} \quad \Delta C_1 = C_1 - C'_1 \text{ и т. д.}$$

$$\text{Отн.} \quad \delta C_1 = \frac{C_1}{\Delta C_1} \cdot 100\% \text{ и т. д.}$$

Примечание: Для емкостей, превышающих предел измерителя $C-2$ берется за фактическое значение емкости, значение, полученное измерителем $C-1$.

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

1. **Задание.** Определить отношение электродвижущих сил данных источников тока.

2. **Приборы и принадлежности.** Натянутый на линейке однородный провод с контактным движком, гальванометр, аккумулятор 2—4 в, 2 сравниваемых источника постоянного тока, 2 контактных ключа и провода.

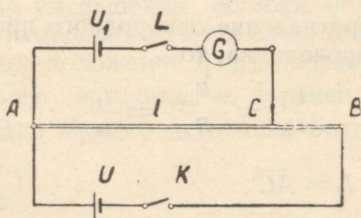


Рис. 14

3. **Выполнение работы.** Составляем схему по рис. 14 (не подсоединяя проводов к источникам тока), где прямая AB обозначает однородный провод, C — контактный движок, U_1 — сравниваемый источник тока, U — аккумулятор 2—4 в (т. е. большей эдс, чем сравниваемые). G — гальванометр, K и L контактные ключи. Обратите внимание на то, чтобы источники U и U_1 были подключены к точке A одинаковыми полюсами. Собранныю схему необходимо показать ассистенту и получить разрешение подключить источники тока.

Если замкнуть ключ K , то по цепи UAB потечет ток I , и на участке провода AC с сопротивлением R_{AC} возникает падение напряжения IR_{AC} . Если на момент включить ключ L , то гальванометр покажет ток. Если движок C расположен близко к B — ток возникнет в одном направлении, если близко к A , то в другом направлении. Следовательно есть положение контактного движка C , в котором через гальванометр тока нет. Тогда для цепи U_1AC можем записать второй закон Кирхгофа:

$$U_1 = IR_{AC}. \quad (1)$$

Если вместо источника тока U_1 подключим другой, эдс которого U_2 , то, найдя положение контактного движка C' , в котором ток через гальванометр равен нулю, можем опять для цепи U_2AC' записать второй закон Кирхгофа

$$U_2 = IR_{AC'}. \quad (2)$$

Ток I в обоих случаях один и тот же, так как ни сопротивление, ни эдс цепи UAB не меняется.

Поделив одно уравнение на другое, получим

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_{AC}}{R_{AC'}}. \quad (3)$$

Но так как сопротивление однородного проводника пропорционально длине проводника, то

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_{AC}}{R_{AC'}} = \frac{l_1}{l_2}, \quad (4)$$

где $l_1 = \overline{AC}$ и $l_2 = \overline{AC'}$.

Нахождение положения контактного движка, в котором гальванометр не показывает тока, производится практически следующим образом. Движок C устанавливается на каком либо делении.

Затем замыкают ключем K цепь аккумулятора U и, наблюдая гальванометр, на момент замыкают цепь источника U_1 ключем L , устанавливают направление отброса гальванометра (направо и налево) и затем отпускают ключ K . Отсчет положения движка C заносим в таблицу (см. ниже) соответственно направлению гальванометра.

Необходимо следить, чтобы при включенном ключе L (в цепи гальванометра) ключ K был замкнут, т. е. ключ K

замыкается первым и размыкается последним. Если ключ K разомкнут, то нет компенсирующего напряжения IR_{AC} и при включении ключа L через гальванометр идет сильный ток.

Переставив движек в новое положение и записав это положение в протоколе и включая ключи, наблюдаем опять направление отклонения гальванометра и заносим в протокол.

Если найдем два соседних положения движка, в которых отбросы гальванометра противоположны, то точка равновесия лежит между этими положениями и ее надо установить более точно, продолжая работать тем же методом.

Токи включаются только на момент, так как длительное пропускание тока разряжает батарею и ведет к неправильному результату.

Возможно, что гальванометр (если он не достаточно чувствительный) не показывает тока на небольшом участке. Тогда надо определить концы участка, где гальванометр начинает показывать ток (у одного конца в одну сторону, у другого в другую). Равновесная точка будет посередине участка.

При большой чувствительности гальванометра иногда не удастся найти точку полного отсутствия тока. Тогда находим возможно короткий участок (например 0,5 мм), в концах которого гальванометр дает отклонения в разные стороны. Равновесной точкой можем здесь считать середину такого участка.

Так как напряжение батареи в течение опыта все же могло понизиться, то для уменьшения ошибки, обусловленной этим обстоятельством, измерения ведут в следующем порядке. Определяют равновесное положение l'_1 для первого источника тока, затем l_2 для второго источника и, наконец, снова l''_1 для первого источника. Для первого источника берем арифметическое

$$\text{среднее } l_1 = \frac{l'_1 + l''_1}{2}.$$

Результаты заносим в таблицу:

	I источник		II источник		I источник	
	отклонение		отклонение		отклонение	
	налево	направо	налево	направо	налево	направо
Положение движка . . .						
Нулевое положение . . .	$l'_1 =$		$l_2 =$		$l''_1 =$	

$$l_1 = \frac{l_1' + l_1''}{2} =$$

$$\frac{\text{эдс. I источника}}{\text{эдс. II источника}} = \frac{l_1}{l_2}.$$

КАЛИБРОВКА ТАНГЕНС-ГАЛЬВАНОМЕТРА

1. **Задание:** Определить постоянную тангенс-гальванометра.

2. **Необходимые приборы и материалы:** тангенс-гальванометр, источник тока, напряжение которого больше 2-х вольт, коммутатор, регулируемый реостат, медный кулонометр и провода.

3. **Общие замечания.** В тангенс-гальванометре имеем случай взаимодействия 2-х магнитных полей. Если витки катушки гальванометра установить в плоскости магнитного меридиана Земли, то и магнитная стрелка находится в плоскости витков катушки.

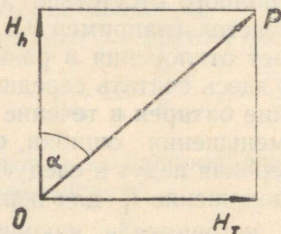


Рис. 15

Если через катушку тангенс-гальванометра идет ток, то вокруг проводов катушки возникает магнитное поле, силовые линии которого окружают проводник замкнутыми кривыми.

В центре катушки, где находится магнитная стрелка, поле тока перпендикулярно плоскости витка. Поле Земли (H_h) и поле тока (H_T) слагаются, как вектора, по правилу параллелограмма и магнитная стрелка ориентируется в направлении результирующего поля (положение OP , как показано на рис. 15).

Отсюда:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H_T}{H_h}. \quad (1)$$

где φ — угол отклонения магнитной стрелки;
 H_T — сила магнитного поля, вызванного током;
 H_h — горизонтальная составляющая магнитного поля Земли.

Так как в вышеприведенную формулу входит тангенс, то и соответствующий гальванометр назван тангенс-гальванометром.

Поле тока пропорционально силе тока, т. е.

$$H_T = C_1 I,$$

(где C_1 постоянная), то формулу (1) можно переписать:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{C_1 I}{H_h}, \quad \text{а} \quad I = \frac{H_h}{C_1} \operatorname{tg} \varphi.$$

Пусть $\frac{H_h}{C_1} = C$, тогда

$$I = C \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где C называется постоянной тангенс-гальванометра. Зная C , мы можем определить силу тока, если известен тангенс угла отклонения магнитной стрелки, или другими словами: — зная C , можем употреблять тангенс-гальванометр в качестве амперметра.

Из формулы $I = C \operatorname{tg} \varphi$ выясняется также, что для определения C надо определить тангенс угла отклонения магнитной стрелки и вызывающую это отклонение силу тока I . Силу тока в данной работе определяют при помощи кулонометра. Кулонометр представляет из себя маленькую электролизную ванночку, через которую пропускают измеряемый ток. Количество выделяющегося металла на катоде по первому закону Фарадея пропорционально количеству электричества, протекающего через электролит.

В настоящей работе кулонометром служит стеклянная банка с раствором медного купороса (CuSO_4), в которой имеются два медных электрода (пластинки).

При пропускании через электролит тока медь с анода (+) переносится на катод (—). Если электрохимический эквивалент меди известен (т. е. количество меди, которое выделяется при прохождении одного кулона электричества), то, следовательно, зная количество выделившейся меди, можем вычислить количество протекшего электричества Q .

Если сила тока постоянная (что видно по постоянству отклонения стрелки тангенс-гальванометра), то

$$Q = It,$$

где t — время прохождения тока через электролит. Если время измерено, то силу тока находим по формуле

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Обычно в течение опыта сила тока несколько спадает, поэтому находим среднее значение тока и соответственно средний угол отклонения.

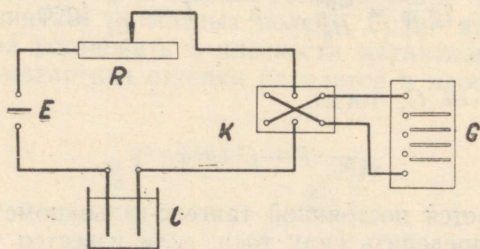


Рис. 16.

На рис. 16 приведена схема соединений, где E — источник тока, R — регулируемый реостат, K — коммутатор, C — кулонометр, G — тангенс-гальванометр.

4. Проведение работы. Медные пластинки кулонометра надо тщательно вычистить стеклянной шкуркой, после чего уже не касаться пальцами чищенной поверхности пластинок, т. к. имеющийся на руках жир препятствовал бы осаждению меди.

Затем взвесить катод и анод на аналитических весах.

Обмотку гальванометра установить по магнитному меридиану Земли, т. е. так, чтобы плоскости витков были параллельны магнитной стрелке. До опыта, без кулонометра, желательно урегулировать силу тока при помощи реостата так, чтобы угол отклонения магнитной стрелки был около 45° .

Коммутатор включают таким образом, чтобы при его переключении менялось направление тока в гальванометре, но не менялось в кулонометре.

Угол ϕ отсчитывают в течение 20 минут через каждые 2 минуты, изменяя при этом каждый раз коммутатором направление тока. По полученным наблюдениям вычисляется для угла отклонения арифметическое среднее. Так как ток прерывается при каждом коммутировании, то коммутировать надо очень быстро, чтобы продолжительность перерыва была бы в сравнении с продолжительностью опыта ничтожно малой.

Закончив пропускание тока, анод и катод споласкивают сперва под краном, а затем дистиллированной водой, стряхивают капли воды и окончательно сушат над газовой горелкой. (Не нагревайте очень сильно, чтобы медь не окислилась!). Взвешивают пластины и находят изменение их массы. Теоретически изменения масс обоих электродов должны быть равны, ибо анод теряет меди столько, сколько получает катод (в виде осадка). Вследствие ряда причин, часто эти величины равными не оказываются, и берется их арифметическое среднее.

Данные измерений вносятся по следующей схеме:

	Анодная пластинка	Катодная пластинка
Вес перед электролизом		
Вес после электролиза		
Разность	$m_1 =$	$m_2 =$

$$\text{Количество меди: } m = \frac{1}{2} (m_1 + m_2).$$

Отсчеты отклонения магнитной стрелки:

	Отклонение вправо	Отклонение влево
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

Среднее $\phi_n =$

Среднее $\phi_d =$

$$\text{Общее среднее } \varphi = \frac{\varphi_n + \varphi_l}{2} =$$

$$\text{tg } \varphi = \dots \dots \dots ,$$

$$t = \dots \dots \dots \text{ сек.}$$

$$m = \dots \dots \dots \text{ мг.}$$

$$A = 0,329 \frac{\text{мг}}{\text{кул}},$$

$$C = \frac{m}{AT \text{ tg } \varphi} = \dots \dots \dots \text{ ампер.}$$

Показать, что единицей C будет ампер.

Контрольные вопросы

1. Если в тангенс-гальванометре вместо одного витка применять 2, 3, 4 витка, останется ли тогда « C » прежним?
2. Какой силы ток надо пропускать через провода гальванометра чтоб стрелка отклонилась на 90° ?
3. От каких факторов зависит положение стрелки?
4. Изменяет ли коммутатор направление тока в электролите или нет?

КАЛИБРОВКА ТЕРМОЭЛЕМЕНТА

1. **Задание.** Калибровка термоэлемента по постоянным точкам.

2. **Приборы и принадлежности.** Калибруемая термопара, милливольтметр, кипятильник, тигель со свинцом, тигель с цинком и электропечь или бунзеновская горелка, штатив для крепления термопары, провода.

3. **Общие замечания.** Если спаять две металлические проволоки из разных металлов обоими концами так, чтобы получилась замкнутая цепь (рис. 17), то при наличии разности температур спаев в цепи появится электродвижущая сила и возникает ток, который регистрирует включенный гальванометр.

Спаянные таким образом металлы называются термопарами или термоэлементами. В первом приближении термо-эдс можно считать пропорциональной разности темпера-

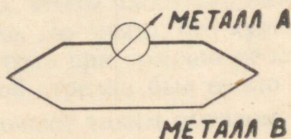


Рис. 17.

тур спаев. Термо-эдс бывает обычно порядка сотых милливольт на градус. Благодаря тому, что термо-эдс зависит от разницы температур спаев, термоэлементы употребляют для измерения разности температур.

Существуют однако и такие термопары, у которых с увеличением разницы температур эдс сначала растет в одном направлении, но потом, начиная с некоторой температуры, уменьшается и при еще более высоких температурах переходит через нуль и меняет знак — т. е. увеличивается в направлении, противоположном начальному. Такими термопарами являются *Cu—Fe*, *W—Mo* и другие.

Термопары имеют целый ряд преимуществ перед другими приборами для измерения температур. Они охватывают весь диапазон температур, встречающихся в технике (от -200°C до 2000°C); позволяют осуществить дистанционное измерение температур во многих точках, используя для этого лишь один милливольтметр и сосредоточить таким образом наблюдение за температурами в одном месте; обладают очень высокой чувствительностью. При помощи термоэлементов легко осуществить автоматическую регулировку температуры, ее запись и т. д. Поэтому они широко применяются в технике.

Наиболее часто применяемые термопары платина-платина-родиевый сплав (до 1600°C), хромель-алюмель (до 1300°C), железо-константан (до 900°C), хромель-копель (до 800°C), медь-константан (до 600°C) и др. У этих термопар зависимость термо-эдс от разности температур мало отличается от линейной. То-есть на протяжении довольно большого интервала температур приближенно можно записать

$$E = b \Delta t,$$

где b — некоторая постоянная, а Δt — разность температур спаев. Однако при более точных измерениях и в большом интервале температур необходимо учитывать нелинейность зависимости термо-эдс от разности температур. В интервале температур в несколько сот градусов эта зависимость с достаточной точностью интерполируется полиномом второй степени:

$$E = a + b \Delta t + c (\Delta t)^2,$$

где a , b и c суть эмпирически определяемые константы.

Для определения этих констант надо измерить термо-эдс в трех известных температурных точках. Таким образом получаем систему из трех линейных уравнений, откуда и вычисляются константы.

3. **Проведение работы.** Попросите у преподавателя термоэлемент для калибровки. Термоэлемент калибруем в диапазоне температур 100°C — 420°C , при условии, что холодный спай находится при 0°C . Зависимость термо-эдс от температуры интерполируем полиномом второй степени в трех постоянных точках:

- 1) Точка кипения воды при 1 ат 100°C
- 2) Точка затвердевания чистого свинца . . . 327°C
- 3) Точка затвердевания чистого цинка . . . 419°C .

Спай подводящих проводов с термо-элементом опускаем в сосуд с тающим льдом. Подключаем милливольтметр и проверяем направление тока, слегка нагревая спай термоэлемента. Если стрелка милливольтметра отклоняется от нуля влево, то надо переключить концы проводов у милливольтметра.

Затем спай термоэлемента помещают в кипящую воду возможно ближе к поверхности воды или даже в пары кипящей воды, так как температура сильно кипящей воды немного выше 100°C . Когда термо-эдс больше не повышается, отмечают показание милливольтметра: это значение соответствует тогда разнице температур спаев, т. е. 100°C .

Теперь берут тигель со свинцом, помещают туда спай и нагревают тигель на горелке или в электропечи до тех пор, пока весь свинец в тигеле расплавится; тогда прекращают нагревание, дают тиглю остыть и наблюдают, когда затвердеет свинец. В момент затвердевания отмечают показание милливольтметра, это — приблизительный результат. После этого опять нагревают тигель, пока свинец снова расплавится (до отклонения стрелки милливольтметра на 4—5 делений выше точки затвердевания). Затем тигель медленно остужают и отмечают показания милливольтметра через каждые 15 секунд до тех пор, пока показания милливольтметра не спадут на 4—5 делений ниже точки затвердевания. По полученным данным вычерчивают график зависимости термо-эдс от времени:

$$E = E(t).$$

При затвердении свинца выделяется скрытая теплота плавления, благодаря чему при затвердевании возникает маленькая остановка в спаде температуры и вследствие этого остановка падения термо-эдс термоэлемента. Следовательно значение термо-эдс на протяжении остановки спадания и будет соответствовать температуре затвердевания свинца, т. е. 327°C . Чтобы вынуть термоэлемент из затвердевшего свинца, его придется снова расплавить.

Защитная трубка термоэлемента и изоляция изготовлены из стекла. Поэтому термоэлементы надо очень осторожно нагревать и охлаждать; ни в коем случае не опускать холодную стеклянную трубку в жидкий металл. Измерения с цинком производятся аналогично вышеописанным. Точка плавления цинка равна 419°C.

Запись результатов измерения и вычисления производится по нижеследующей схеме:

Т а б л и ц а 2

№	Постоянные температуры	Термо-эдс
1	419°C	$E_1 =$
2	327°C	$E_2 =$
3	100°C	$E_3 =$

Из полученных данных составляем систему уравнений для определения коэффициентов интерполяционного полинома.

$$1) E_1 = a + b \Delta t_1 + c(\Delta t_1)^2$$

$$2) E_2 = a + b \Delta t_2 + c(\Delta t_2)^2$$

$$3) E_3 = a + b \Delta t_3 + c(\Delta t_3)^2$$

Системы линейных уравнений проще всего решаются при помощи определителей.

В данном случае решения для b и c приводятся к следующему виду:

$$c = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \frac{E_2 - E_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1} \\ 1 & \frac{E_3 - E_2}{\Delta t_3 - \Delta t_2} \end{vmatrix}}{\Delta t_3 - \Delta t_1}; \quad b = \frac{\begin{vmatrix} \frac{E_2 - E_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1} & \Delta t_1 + \Delta t_2 \\ \frac{E_3 - E_2}{\Delta t_3 - \Delta t_2} & \Delta t_2 + \Delta t_3 \end{vmatrix}}{\Delta t_3 - \Delta t_1}.$$

a получим, если подставим в уравнение найденные значения b и c .

При помощи найденного полинома вычисляем значения E для 10-ти промежуточных температур (которые указывает ассистент) и по этим точкам строим калибровочный график. (Рис. 17-а):

Таблица I.

1. Кипящая вода $t = 100^{\circ}\text{C}$ Термо-эдс $E = \dots$ мВ

II. Pb (свинец)		III. Zn (цинк)			
Время	Термо-эдс E мВ	Темп. $^{\circ}\text{C}$	Время	Термо-эдс E мВ	Темп. $^{\circ}\text{C}$
	а) Приближенное нахождение точки затвердевания при первоначальном охлаждении	327 $^{\circ}\text{C}$		а) Нахождение приближенной точки затвердевания при первоначальном охлаждении	419 $^{\circ}\text{C}$
0 сек	б) Нахождение точной точки затвердевания при медленном охлаждении		0 сек	б) Нахождение точной точки затвердевания при медленном охлаждении	
15 сек	(Начинать отсчеты на 5 мв выше приближенной точки затвердев.)			(Начинать отсчеты 5 мв выше приближенной точки затвердев.)	
30 сек	Остановка падения напряжения	327 $^{\circ}\text{C}$		Остановка падения напряжения	419 $^{\circ}\text{C}$

Для более наглядного определения термо-эдс остановки по полученной таблице составлением графики.

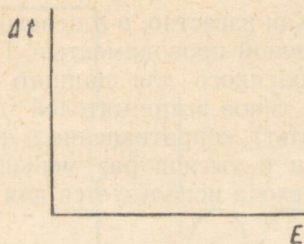


Рис. 17-а

Все вычисления занести в протокол, чтобы можно было контролировать каждое действие.

Для вычисления полинома его целесообразно представить в виде:

$$E = a + (b + c \Delta t) \Delta t$$

и пользоваться схемой-таблицей:

Таблица 3

Разница температур Δt	a	$c \Delta t$	$c \Delta t + b$	$(c \Delta t + b) \Delta t$	$E = (c \Delta t + b) \Delta t + a$ [мВ]
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					

ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. Приборы и принадлежности. Источник переменного тока регулируемого напряжения, полупроводниковый выпрямитель, собранный по схеме Гретца, вольтметр (15; 30 в) и амперметр постоянного тока (3а), реостат (28 Ω) и провода.

2. **Общие сведения.** Как известно, p - n переход в полупроводнике обладает несимметричной проводимостью. При напряжении, не превышающем дозволенного для данного типа выпрямителя (которое для разных типов выпрямителей колеблется от десяти до нескольких сот вольт), сопротивление p - n перехода в прямом направлении в сотни и тысячи раз меньше, чем в обратном. Это свойство p - n перехода используется для выпрямления переменного тока.

Если напряжение выше нормального, то сопротивление обратному току падает. При выпрямлении переменного тока появляется сильный обратный ток, вследствие чего выпрямитель перегревается и может испортиться, — не говоря о том, что в таких условиях кпд. выпрямителя сильно падает.

На схеме выпрямитель-диод обозначается символом, изображенным на рис. 18,



Рис. 18.

причем острие треугольника направлено в направлении условного тока.

Если выпрямитель соединен по простой схеме (Схема выпрямления с одним выпрямителем рис. 19), то он пропускает только одну полуволну. Получаемый ток будет прерываться на полпериода. Диаграмма такого выпрямленного тока приведена на рис. 20.

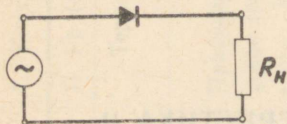


Рис. 19

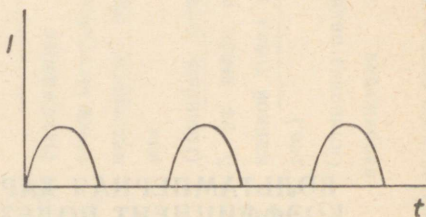


Рис. 20

Если же использовать четыре выпрямителя в схеме Гретца (рис. 21), то получим непрерывающийся, но пульсирующий ток (рис. 22).

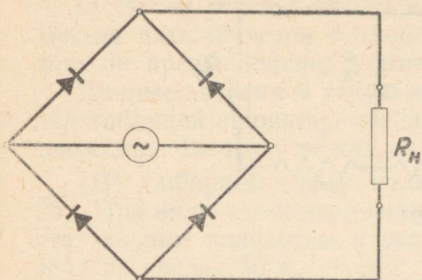


Рис. 21

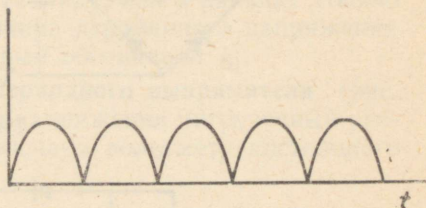


Рис. 22

Если выпрямляемое напряжение высоко, то вместо одного *p-n* перехода включается последовательно несколько, так, чтобы обратное напряжение на каждом *p-n* переходе не превышало нормальное для данного типа. При этом включаемые последовательно *p-n* переходы должны иметь не только одинаковые характеристики по напряжению, но и по всем другим техническим данным. Практически диски *p-n* перехода собираются в столбик. Тогда схема Гретца (с двумя последовательно включенными *p-n* переходами) выглядит следующим образом (рис. 23).

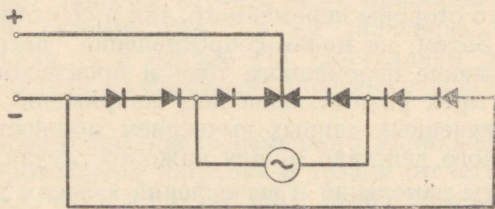


Рис. 23.

Однако весьма часто требуется постоянный ток неп пульсирующий. Тогда пульсирующий ток «сглаживают» при помощи включения в цепь постоянного тока конденсаторов и индуктивностей (рис. 24). Чем больше снимаемый ток, тем слабее он «сглаживается», тем больше должны быть емкости $C_1, C_2 \dots$ и индуктивности $L_1, L_2 \dots$. Чем сильнее хотим ток сгладить, тем больше должно быть цепей *LC*.

3. Выполнение работы. (I) Собираем схему для снятия характеристики полупериодного выпрямителя (рис. 25).

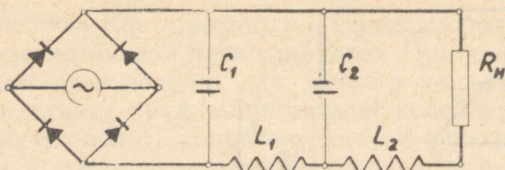


Рис. 24

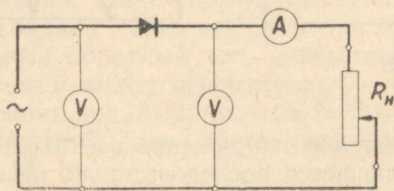


Рис. 25

При включении напряжения в схему нагрузочный реостат вводим полностью.

(а) При включенном напряжении устанавливаем величину переменного напряжения в 30 вольт, а величину постоянного тока в 2 ампера. Заносим все отсчеты (значения тока и напряжения, как со стороны переменного, так и со стороны постоянного тока). Затем, не меняя сопротивления нагрузки, уменьшаем напряжение переменного тока и производим измерения еще при четырех разных значениях напряжения переменного тока. Из полученных данных вычисляем мощность и коэффициент полезного действия η_1 для каждого случая.

Результаты измерений и вычислений заносим в следующую таблицу.

(Сопротивление нагрузки постоянное.)

№	Постоянный ток			Переменный ток			η_1 $\left[\frac{N=}{N\sim} \right]$
	в	а	вт	в	а	вт	
1							
2							
3							
4							
5							

б) Затем устанавливаем переменное напряжение на 30 в и делаем пять отсчетов с приборов при разных значениях силы тока, не превышающих 5 ампер.

Данные заносим в такую-же таблицу, как и раньше. Только над таблицей запишем, что величина переменного напряжения неизменна. Вычисляем кпд, который обозначаем η'_1 .

(II) Собираем схему **полноperiodного выпрямителя** (рис. 26). При включении переменного напряжения нагрузочный реостат вводим полностью и переключаем вольтметр постоянного тока на предел 30 в.

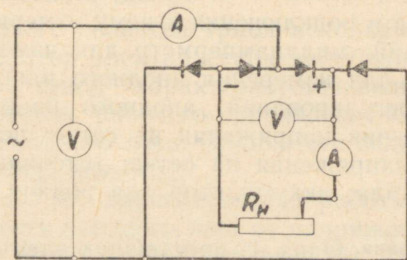


Рис. 26

(а) При включенном напряжении устанавливаем величину переменного напряжения в 30 в, а постоянный ток через нагрузку в 3 ампера. Заносим отсчеты всех приборов в протокол. Далее делаем отсчеты при тех же значениях переменного напряжения как и в случае (1). Составляем аналогичную таблицу, обозначая коэффициент полезного действия на этот раз η_2 .

(б) Установив значение переменного напряжения на 30 в, изменяем сопротивление нагрузки и делаем отсчеты при тех же значениях тока, что и в случае (Iб). Вычисляем кпд. η'_2 .

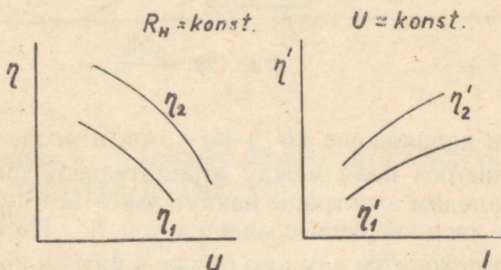


Рис. 27.

На основании полученных данных составляем графики зависимости КПД выпрямителя η_1 и η_2 от величины выпрямляемого напряжения при неизменной величине нагрузочного сопротивления и зависимость к.п.д. выпрямителя η_1 и η_2 от тока нагрузки при неизменном выпрямляемом напряжении. (См. рис. 27).

ХАРАКТЕРИСТИКА ТРИОДА

1. **Задание.** Снять статическую характеристику триода.

2. **Приборы и принадлежности.** Триод; монтажная доска для установки триода и подключения к нему измерительных приборов и напряжений; миллиамперметр для измерения анодного тока; вольтметр для измерения анодного напряжения; потенциометр для регулирования анодного напряжения; вольтметр для измерения напряжения на сетке; потенциометр для регулирования напряжения на сетке; источник анодного напряжения и накала; аккумулятор для подачи напряжения на сетку; провода.

3. **Общие замечания.** Одна из простейших электронных ламп — триод состоит из заключенных в стеклянный баллон с высоким вакуумом: нити катода (1), сетки (2) и анодной пластины (3) (рис. 28). Нить катода накаливается током до высокой температуры и она начинает испускать (эмитировать) электроны.

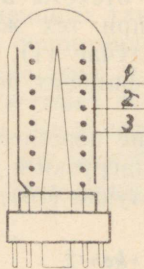


Рис. 28

Если дать напряжение (U_a) на катод и анод, то под влиянием создавшегося поля между отрицательной нитью и положительным анодом электроны начнут двигаться на анод, вследствие чего в анодной цепи создается ток I_a . По сравнению с анодом сетка находится намного ближе к нити, и поэтому значительно меньшее напряжение между нитью и сеткой (U_c) мо-

жет создать поле такой же величины, как и анод, имеющий заметно большее напряжение относительно нити.

Если в частности поле сетки противоположно полю анода и равно ему, то электроны ускоряться не будут, так как сумма полей равна нулю. Следовательно, сравнительно маленьким напряжением на сетке (от 4 до 6 в.) мы можем запереть анодный ток. Таким образом оказывается, что малым изменением напряжения на сетке (порядка вольта) мы можем изменять анодный ток на такие значения, для достижения которых потребовалось бы изменить анодное напряжение на десятки и даже сотни вольт.

Вследствие этого свойства триод используется как усилитель и как генератор электрических колебаний.

В основном триод характеризуется величиной рабочего анодного напряжения, рабочего напряжения на сетке и максимальной силой анодного тока. Однако эти величины не указывают свойств триода в работе.

Для более полной характеристики работы триода даются кривые зависимости анодного тока от напряжений на сетке при разных анодных напряжениях (см. рис. 29).

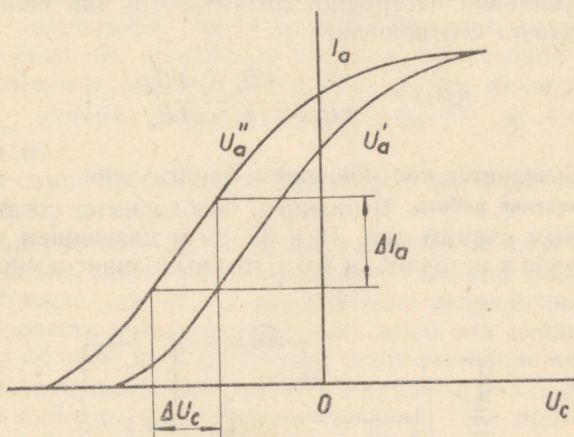


Рис. 29

На основании этих кривых можно дать следующие три числовые характеристики трубки:

1. Крутизна:

$$S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \right) U_a = \text{const.} \quad \frac{\text{ма}}{\text{ВОЛЬТ}}$$

для прямолинейной части кривой. Как видно из выражения крутизны, она зависит от значения анодного напряжения U_a .

2. Внутреннее сопротивление:

$$R_b = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_c = \text{const.}} \quad \Omega,$$

где $\Delta U_a = U_a'' - U_a'$.

Как видно, внутреннее сопротивление является функцией напряжения на сетке и дается для рабочего сеточного напряжения U_c .

3. Проницаемость:

$$D = \left(\frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} \right)_{I_a = \text{const.}}$$

Обратную величину проницаемости, $\frac{1}{D}$, называют коэффициентом усиления. Нетрудно заметить, что для величин S , R и D существует соотношение

$$SRD = \frac{\Delta I_a \cdot \Delta U_a \cdot \Delta U_c}{\Delta U_c \cdot \Delta I_a \cdot \Delta U_a} = 1,$$

которое называется соотношением Баркгаузена.

4. **Проведение работы.** Выполнить необходимые соединения по приведенным схемам рис. 31 и 32, за исключением подключения проводов к источникам тока, что выполняет ассистент.

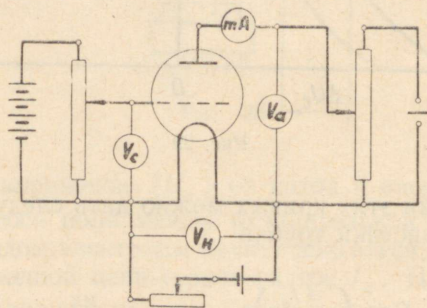


Рис. 30. Принципиальная схема соединения.

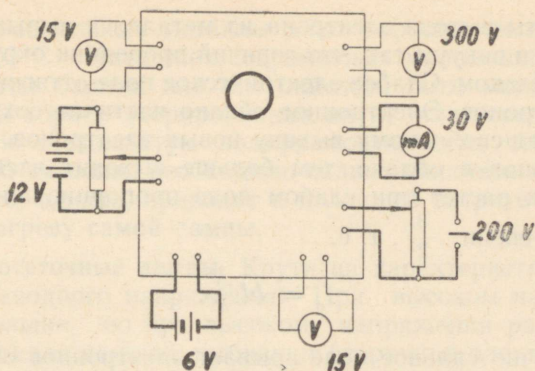


Рис. 31. Расположение клемм на монтажной доске.

При выполнении соединений обратить внимание на полярность; к положительным клеммам подключаются положительные концы источников и измерительных приборов. Далее необходимо получить от ассистента конкретное задание и значение анодных напряжений, при которых предстоит снять характеристики. Получив конкретное задание, приступаем к измерениям. Измеряем анодный ток I_a при одном из заданных значений U_a , изменяя сеточное напряжение U_c от +6 до -6 в, через 1 вольт.

То же самое проделываем при втором значении анодного напряжения U'_a и т. д.

Для получения отрицательных напряжений на сетке необходимо поменять концы у аккумулятора и соответственно у вольтметра. Прежде чем менять направление напряжения на сетке, можно провести измерения при всех заданных анодных напряжениях в области положительных сеточных напряжений.

Результаты измерений заносят в таблицу. На основании полученной таблицы вычерчиваем графики. Для прямолинейной части кривой вычислим величины S , R , D и проверим правильность вычисления по соотношению Баркгаузена.

5. Приложение: а) **Термоэлектронная эмиссия.** Уже Эдисон заметил, что в вакууме ток между электродами проходит только тогда, когда отрицательный электрод сильно накален. Теорию эффекта дал Ричардсон, почему эффект иногда и называется эффектом Ричардсона. Явление само состоит в том, что при высоких температурах проводника некоторые электроны приобретают кинетическую энергию, достаточную для преодо-

ления работы выхода электрона из металла и вырываются вон из металла в вакуум так, что горячий проводник окружен электронным облаком. Слабое электрическое поле оттягивает только часть электронов. Электронное облако частично сохраняется и препятствует свободному выходу новых электронов. Чем меньше электронов в облаке, тем больше выходит электронов из катода. Ток растет при слабом поле пропорционально напряжению в степени $\frac{3}{2}$, т. е.

$$I_a = bU_a^{\frac{3}{2}}.$$

Достаточно сильное поле срывает электронное облако полностью. Число выходящих электронов не зависит от приложенного напряжения и при дальнейшем увеличении напряжения ток больше не растет; соответствующее значение силы тока называется током насыщения (верхняя пологая часть кривой характеристики). Для плотности тока насыщения Ричардсон дал формулу:

$$j = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}},$$

где j — плотность тока (амп/см²),
 T — абсолютная температура проводника,
 ϕ — работа выхода электрона,
 A — константа, зависящая от металла,
 k — константа Больцмана,
 e — основание натуральных логарифмов.

Значения работы выхода и константы A для некоторых металлов.

Металл	ϕ эл. вольт	A $\frac{\text{амп.}}{\text{см}^2 \text{град.}^2}$
Pt	5,29	32
W	4,50	60
Mo	4,27	55
Th	3,41	70
W + Cs	1,36	3,2
W + Ba	2,05	1,5
W + Th	2,63	3,0
W + BaO	1,84	0,18

Как видно из таблицы, у щелочных и щелочно-земельных металлов работы выхода особенно малы, хотя константа A тоже мала, но тем не менее эти металлы дают уже при низких температурах большую эмиссию. Щелочные металлы обладают высоким давлением паров, вследствие чего они легко испаряются и в присутствии их вакуум для нормальной работы электронной трубки недостаточен.

Щелочно-земельные металлы дают хорошую эмиссию уже при $700-800^{\circ}\text{C}$. Нити всех современных маломощных радиоламп покрыты барием или его окислом, нити мощных ламп или покрыты торием (торированные нити), или вовсе ничем не покрываются. Непокрытую вольфрамовую нить, чтобы получить нужную эмиссию, необходимо сильно накаливать (до $2500-2800^{\circ}\text{C}$). Это, однако, приводит к излишней затрате энергии и сильному нагреву самой лампы.

б) **Многосеточные лампы.** Крутизна характеристики лампы зависит от анодного напряжения. При высоком напряжении крутизна больше, но при высоком напряжении разогнанные электроны, падая на анод, выбивают вторичные электроны (так называемый динаatronный эффект), сильно искажающие характеристику лампы в нежелательном направлении. Чтобы не допустить эти вторичные электроны в рабочее пространство лампы, вблизи анода ставится добавочная (антидинаatronная) сетка, на которую относительно анода подается отрицательное напряжение (обыкновенно потенциал нити).

Вследствие наличия емкости между сеткой и анодом, колебания напряжения на аноде передаются на сетку. Такая обратная связь может привести к автоколебаниям, если собственные частоты анодного контура и контура сетки совпадают (что в высокочастотных усилителях является правилом). Поэтому емкость между анодом и управляющей сеткой уменьшают, вводя между анодом и управляющей сеткой еще добавочную экранирующую сетку. Если в лампе сеток больше трех, то это будет сложная лампа, например с двумя управляющими сетками (смеситель) или двойная лампа и т. п.

Лампы с тремя сетками имеют в общей сложности пять электродов и называются пентодами. Коэффициент усиления пентода может достигать значения 1500, а внутреннее сопротивление порядка мегома. Характеристика пентода очень сильно зависит от величины анодного напряжения и величины напряжения управляющей сетки.

Электронной трубкой пользуются:

- 1) для усиления сигналов переменного тока;
- 2) в качестве выпрямителя высокочастотных колебаний (как детектор);
- 3) как генератором высокочастотных колебаний;
- 4) в автоматической и счетной аппаратуре.

Результаты измерений протоколировать по нижеследующей схеме.

Напряжение накала в:

I анодное напряжение в. (назначает ассистент)			II анодное напряжение в. (назначает ассистент)		
Напряже- ние на сетке в.	Анодный ток		Напряже- ние на сетке в.	Анодный ток	
	Непосред- ственный отсчет по шкале (де- лений)	милли- амп.		Непосред- ственный отсчет по шкале (де- лений)	милли- амп.

Положительное напряжение на сетке.

1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					

Отрицательное напряжение на сетке.

1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					

По этим данным построить график, как показано на рис. 29.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ КАТОДНОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

1. **Введение.** Целью настоящей задачи является изучение принципов действия катодного осциллографа.

Осциллограф в основном применяется для следующих целей:

1. Исследование напряжения или тока быстропеременных процессов в зависимости от времени или от напряжения или тока какого либо другого процесса.

2. Сравнение амплитуд двух напряжений или двух токов.

3. Сравнение фаз двух токов, двух напряжений или тока и напряжения.

4. Определение частот колебаний, измерение малых промежутков времени.

2. Устройство и работа катодного осциллографа. Катодный осциллограф состоит из пяти основных узлов:

1. электронно-лучевой трубки (ЭЛТ),
2. питающего устройства,
3. генератора развертки,
4. усилителя исследуемого напряжения и
5. устройства синхронизации.

а) Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) позволяет получить узкий сфокусированный пучок электронов, который практически является безинерционным. По принципу фокусировки и отклонения электронного луча трубки бывают двух типов: электростатические и магнитные. В трубках первого типа для фокусировки и отклонения луча используется электрическое поле, в трубках второго типа — магнитное поле.

Остановимся более подробно на устройстве вакуумной электростатической электронно-лучевой трубки, в которой фокусировка луча осуществляется при помощи двух электрических линз.

На рис. 32 приведена схема устройства электронно-лучевой трубки. Она состоит из электронной пушки (выделена пунктиром на рисунке и отмечена цифрой 3), отклоняющих пластин 8 и

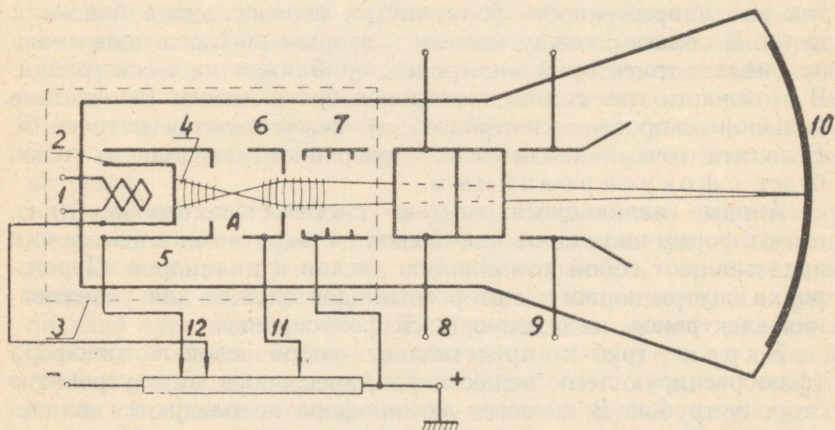


Рис. 32. Электрическая электронно-лучевая трубка:

1 — подогрев, 2 — катод, 3 — электронная пушка (обведена пунктиром), 4 — эмиттирующая поверхность, 5 — фокусирующий цилиндр, 6 — первый (фокусирующий) анод, 7 — второй анод, 8 — горизонтально отклоняющие пластины, 9 — вертикально отклоняющие пластины, 10 — флюоресцирующий экран, 11 — управление фокусировкой, 12 — управление яркостью.

9, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, и флюоресцирующего экрана 10. Прочие детали конструкции трубки указаны в подписи к рисунку.

Электронной пушкой называется часть трубки, дающая пучек электронов. В эту часть трубки вмонтированы: катод косвенного накала, являющийся источником электронов; фокусирующий цилиндр (называемый часто: «управляющая сетка»), регулирующий количество вылетающих в единицу времени электронов, т. е. яркость пятна на экране; первый (фокусирующий) анод и второй (ускоряющий) анод. Напряжение, приложенное к первому и второму анодам, ускоряет электроны и концентрирует их в узкий пучек. Поле между катодом, фокусирующим цилиндром и первым анодом образует объективную электронную линзу; окулярная электронная линза образуется полем первого и второго анодов.

Плоская торцевая поверхность катода покрывается оксидом и подогревается нитью накала. Большинство эмитируемых с катода электронов направляется вдоль оси трубки электрическим полем между катодом и фокусирующим цилиндром. Электроны, получившие правильное направление движения, проходят через отверстие фокусирующего цилиндра и под действием поля объективной линзы сходятся в точке *A*, находящейся перед первым анодом. После точки *A* электроны расходятся, так как напряженность поля внутри первого анода близка к нулю. В области между первым и вторым анодами поле снова искривляет траектории электронов, приближая их к оси трубки. В этой части траектории электронов более пологи (вследствие большой скорости электронов) и фокусируются в точке *B*. Если эта точка находится на поверхности экрана, то пучок будет сфокусированным.

Аноды, являющиеся частью системы электронных линз, имеют форму цилиндров или дисков с отверстиями в центре или представляют собой комбинацию дисков и цилиндров. Перегородки внутри первого и второго анодов служат для улавливания электронов, не поддающихся фокусировке.

Экран трубки представляет собой слой люминофора (флюоресцирующего вещества), нанесенного на внутреннюю сторону трубки. В качестве люминофора используются виллемит, вольфрамово-кислый кальций, сульфид цинка. При попадании электронов на экран из последнего выбиваются вторичные электроны, которые летят ко второму аноду и там замыкают цепь тока. Точка экрана, на которую попадают электроны, светится, и мы видим место попадания электронов. В зависимости от состава люминофора пятно может быть белого, зеленого или

синего цвета. Послесвечение у разных люминофоров может варьировать от долей микросекунды до минут.

Если на отклоняющие пластины приложено напряжение, то электронный луч отклоняется. Величина этого отклонения пропорциональна напряжению между пластинами. На вертикально расположенные пластины 8 (X-пластины) подается обычно напряжение от генератора развертки, которое заставляет пятно равномерно двигаться на экране по горизонтальной прямой. Если на пару горизонтально расположенных пластин 9 (Y-пластины), подать исследуемое, периодически меняющееся напряжение, то пятно будет перемещаться по экрану в вертикальном направлении. Таким образом одновременное действие обеих пар пластин на электронный луч позволяет наблюдать на экране изменение исследуемого напряжения во времени.

Если период напряжения развертки равен или кратен периоду исследуемого напряжения, картина за период развертки будет полностью повторяться, и мы увидим на экране неподвижную (застывшую) картину.

Имеются, как уже указывалось, конструкции электронно-лучевых трубок, в которых отклонение электронного пучка достигается магнитным полем, силовые линии которого перпендикулярны к оси трубки. Следует заметить, что для измерительных целей применяются главным образом трубки с электростатическим отклонением луча. В телевидении наибольшее распространение получили трубки с магнитным отклонением, причем в них применяется также и магнитная фокусировка луча. Метод магнитного отклонения является менее гибким, так как для разных измерений требуются различные отклоняющие катушки.

Величина отклонения луча на экране, деленная на величину напряжения на отклоняющих пластинах называется чувствительностью трубки. Чувствительность трубки тем меньше, чем выше ускоряющее анодное напряжение. Для увеличения чувствительности ЭЛТ в последнее время делаются попытки усовершенствовать конструкцию электронно-лучевой трубки в направлении уменьшения рабочего анодного напряжения. Современные электронно-лучевые трубки дают достаточно яркую картину уже при анодном напряжении в 1000 в.

б) Питание электронного осциллографа. Для нормальной работы узлов электронного осциллографа необходимы стабилизированные постоянные напряжения весьма различных величин и сил токов. Задачу преобразования переменного тока электрической сети в необходимые для работы осцил-

лографа напряжения выполняет питающее устройство. Переменный ток сети поступает в трансформатор питающего устройства, имеющий несколько вторичных обмоток, которые дают необходимые анодные напряжения и токи накала. Все эти напряжения стабилизируются газоразрядными лампами (S) типа «стабиловольт», которые зажигаются (т. е. через них идет ток), как только напряжение превысит установленную величину. Вследствие увеличившегося тока напряжение на сопротивлении R включенном в цепь падает и никогда не превысит заданного значения.

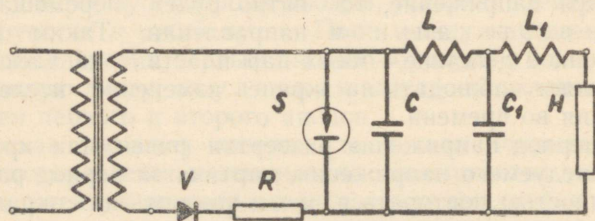


Рис. 33. Схема одной цепи питающего устройства.

Для получения постоянного напряжения ток выпрямляется выпрямителем V и сглаживается цепями LC (см. рис. 33).

Рабочее анодное напряжение электронно-лучевых трубок от 1000 до 6000 в, ток до 0,5 ма. Поэтому для получения тока высоких напряжений часто применяют схемы умножения напряжения.

в) Генератор развертки. Для исследования периодических процессов необходимо осуществить периодически повторяющиеся отклонения электронного луча так, чтобы светящаяся точка двигалась на экране равномерно в одном направлении (например слева на право), затем мгновенно пере-скакивала налево и двигалась бы снова равномерно (т. наз. развертка времени по оси x). Для этого необходимо на вертикально отклоняющие пластины трубки подать пилообразное напряжение. Линейно возрастающее со временем напряжение отклоняет луч с одного края экрана на другой, так что светящаяся точка движется равномерно. В тот момент, когда светящаяся точка достигает края экрана, напряжение мгновенно падает до первоначального значения и процесс повторяется.

Простейшая схема генератора пилообразного напряжения приведена на рис. 34. Конденсатор C заряжается через сопротивление R постоянным напряжением U_0 , вследствие чего на-

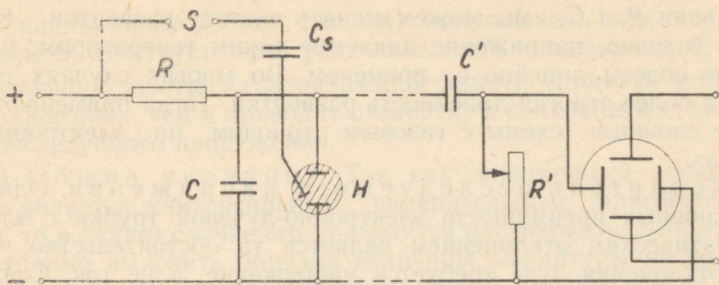


Рис. 34

напряжение на конденсаторе растет со временем экспоненциально. Когда напряжение на конденсаторе достигает определенного напряжения U_3 , зажигается газоразрядная трубка H . Ее сопротивление становится очень малым — конденсатор очень быстро разряжается до напряжения U_r — при котором гаснет разряд в газоразрядной трубке. Напряжение на конденсаторе начнет снова расти до момента зажигания лампы. Хотя рост напряжения идет по экспоненциальному закону, но короткий участок экспоненциальной кривой мало отличается от прямой (рис. 35).

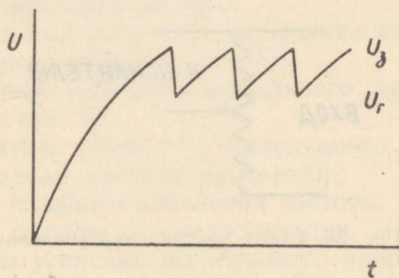


Рис. 35.

Период такой схемы дается выражением (без учета времени разряда):

$$T = RC \ln \frac{U_0 - U_r}{U_0 - U_3},$$

где U — питающее напряжение схемы, U_r — напряжение гашения лампы, U_3 — напряжение зажигания лампы.

Меняя R и C , мы можем менять частоту развертки. Как было указано, напряжение даваемое таким генератором, растет не совсем линейно со временем. Во многих случаях требуется более строгая линейность развертки. Тогда применяются более сложные схемы с газовым триодом на электронных лампах.

г) Усилитель исследуемого напряжения. Одним из основных преимуществ электронно-лучевой трубки с электростатическим отклонением является то обстоятельство, что для отклонения луча требуется напряжение, а не ток. Следовательно необходимая мощность очень мала. Но для достаточного смещения электронного луча необходимо напряжение в несколько сот вольт, т. е. часто превышающее исследуемое напряжение во много раз. Поэтому исследуемые напряжения приходится усиливать.

Для этого применяется широкополосный усилитель, дающий более-менее одинаковое усиление на частотах от десятка герц до нескольких мегагерц.

При исследовании малых, очень медленно меняющихся токов применяются специальные усилители постоянного напряжения, в схеме которых отсутствуют емкости.

Обычно у осциллографа два усилителя, один для усиления напряжения, подаваемого на Y -, — другой на X -пластины.

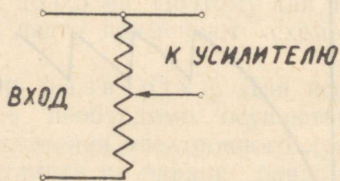


Рис. 36. Схема регуляции усиления.

Для регуляции усиления на входе каждого усилителя имеется потенциометр (рис. 36).

д) Устройство синхронизации. Для получения неподвижного изображения периодического процесса необходимо, чтобы в период генератора развертки укладывалось целое число периодов исследуемого напряжения.

Поэтому исследуемое напряжение подают (часто через усилитель) на генератор развертки, Величина исследуемого напряжения определяет момент зажигания генераторной лампы.

В нашем примере (см. рис. 34) напряжение, поданное на зажимы S , действует через разделительный конденсатор C_s на зажигающий электрод газоразрядной лампы, управляя моментом зажигания, чем и приводит развертку в синхронизм с частотой исследуемого напряжения.

е) Общие указания. Так как электронный осциллограф является универсальным измерительным приспособлением, то в любом случае его приходится настраивать. Для этого необходимо выяснить порядок величины амплитуды исследуемого напряжения, порядок частоты, способ измерения и пр. На основании этих сведений необходимо провести необходимые переключения и выбрать рабочие диапазоны.

Поэтому регуляторы всех основных узлов осциллографа выведены на переднюю панель.

Размещение этих регуляторов на панели может меняться в зависимости от типа осциллографа, однако их назначение остается всегда тем же.

Поэтому любой электронный осциллограф имеет следующие регуляторы и переключатели:

1. Выключатель сети.
2. Выключатель электронного луча (высокого напряжения).
3. Регулятор яркости луча.
4. Регулятор фокусировки луча.
5. Горизонтальный регулятор начального положения луча (регулировка положения оси Y).
6. Вертикальный регулятор начального луча (регулятор положения оси X).
7. Переключатель диапазона исследуемого напряжения.
8. Переключатель частоты развертки.
9. Регулятор плавного изменения частоты.
10. Регулятор амплитуды синхронизации.
11. Регуляторы усиления исследуемого напряжения и развертки. На переднюю панель вынесены и все входные клеммы.

При работе с электронным осциллографом необходимо строго соблюдать следующие требования:

- 1) Выяснить назначение и расположение регуляторов на передней панели.
- 2) Выполнить необходимые соединения, имея в виду, что осциллограф должен быть заземлен; заземлить также и прочие схемы.
- 3) Регуляторы яркости и усиления исследуемого напряже-

ния и развертки должны стоять в крайних левых положениях (на минимуме).

4) Переключатель диапазона входного (исследуемого) напряжения должен стоять на максимальном диапазоне.

5) Частота развертки должна более-менее соответствовать исследуемой частоте.

6) Выключатель «сеть» можно включать только с разрешения ассистента, после того, как он проконтролировал соединения.

Дальнейшее регулирование производят по надобности в зависимости от характера работы.

1. **Задание.** Определить сдвиг фаз между падением напряжения на заданном участке цепи и силой тока.

2. **Приборы и принадлежности.** Электронный осциллограф, имеющий отсчетную сетку на экране; омическое сопротивление (реостат 100Ω , $2a$); импеданс (индуктивность, емкость, омическое сопротивление), который надо получить у ассистента; соединительные провода.

3. **Теория.** При помощи электронного осциллографа можно определить разность фаз двух колебаний одинаковой частоты, а также разность или кратность частот, если частоты не совпадают.

Будем рассматривать случай колебаний с равными частотами, которые могут быть сдвинуты по фазе (например ток и напряжение в цепи переменного тока).

Если напряжение, пропорциональное смещению одного колебания, подадим на горизонтально отклоняющие пластины, а другое на вертикально отклоняющие пластины, то, не сужая общности, можем записать слагаемые колебания, совершающиеся во взаимно перпендикулярных направлениях следующим образом:

$$x = x_0 \sin (\omega t + \varphi)$$

$$y = y_0 \sin \omega t$$

Исключив параметр t (время), получим уравнение траектории точки:

$$x = \frac{x_0}{y_0} y \cos \varphi + x_0 \sqrt{1 - \frac{y^2}{y_0^2}} \cdot \sin \varphi.$$

В зависимости от значения параметра φ мы получаем следующие случаи:

- 1) $\varphi = n\pi$ $x = \frac{x_0}{y_0}y$ — прямая с тангенсом угла наклона $\operatorname{tg} \alpha = \pm \frac{x_0}{y_0}$, где знак (—) будет при нечетном n .
- 2) $\varphi = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$ — эллипс, полуосями которого будут x_0 и y_0 .

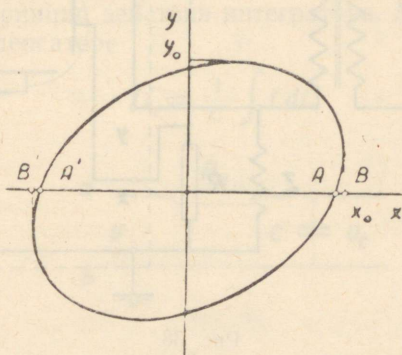


Рис. 37.

Во всех других случаях получаем эллипс, полуосями которого не будут амплитуды слагаемых колебаний. Рассмотрим на таком эллипсе точку $A = (x, 0)$ (рис. 37).

Так как $y = 0$, то $\omega t = n\pi$

$$\begin{aligned} \text{и } x &= x_0 \sin(n\pi + \varphi) = x_0 (\sin n\pi \cdot \cos \varphi + \cos n\pi \cdot \sin \varphi) = \\ &= \pm x_0 \sin \varphi, \end{aligned}$$

откуда

$$\sin \varphi = \pm \frac{x}{x_0}.$$

Таким образом абсолютное значение угла сдвига фаз можно определить, измерив x и x_0 . Чтобы определить знак, надо определить направление движения точки по эллипсу. Если точка движется по направлению часовой стрелки (в направлении отрицательных углов), то, пройдя точку A , y становится отрицательным и следовательно n будет нечетное и φ отрицательное. При другом направлении обхода эллипса φ будет положительным.

4. **Проведение измерений.** Для определения сдвига фаз между напряжением на участке цепи и током в той же цепи мы должны подать напряжение непосредственно на одну пару

(вертикально) отклоняющих пластин осциллографа. На другую пару отклоняющих пластин надо подать напряжение пропорциональное силе тока — т. е. падение напряжения на омическом сопротивлении той же цепи.

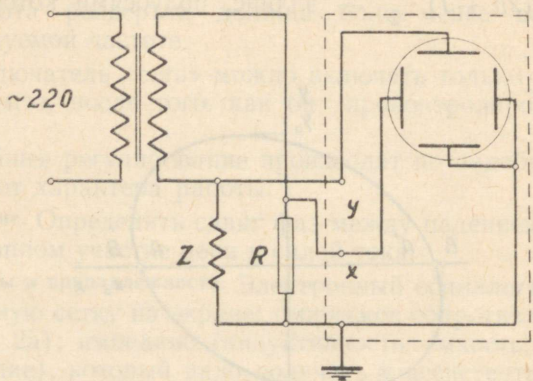


Рис. 38.

На рис. 38 приведена схема соединений, где Z — импеданс (полное сопротивление переменному току) участка цепи,

R — омическое сопротивление ($\approx 100 \Omega$) для получения напряжения пропорционального силе тока,

$\left. \begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right\}$ — входы отклоняющих пластин (противоположные пластины заземлены).

Выполнив соответствующие соединения, их надо показать ассистенту и получить разрешение включить ток. Устанавливаем эллипс по возможности симметричнее относительно осей сетки экрана осциллографа и отсчитываем по сети расстояния $AA' = 2x$ и $BB' = 2x_0$. Смещаем эллипс из своего положения, затем снова устанавливаем его симметрично относительно осей сетки и производим измерения. Таким образом делаем три измерения и находим среднее значение $\sin \varphi$. Необходимо привести соображения о величине погрешности измерения. Для определения знака φ смещаем быстро эллипс. Вследствие способности глаза запоминать картину в течение одной десятой секунды мы увидим несколько эллипсов и направление, в котором точка их обходит.

Выясните, как влияют соединения схемы на правильность определения знака.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ОБРАЗЦА НА ВИД ГИСТЕРЕЗИСНОЙ ПЕТЛИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОН- НОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Изображенная на рис. 39 схема интегратора позволяет наблюдать петлю гистерезиса на экране электронного осциллографа (Э. О.). Об электронном осциллографе см. стр. 54.

Поясним принцип действия интегратора. Мгновенное напряжение на конденсаторе

$$U_c = \frac{1}{C} \int I dt.$$

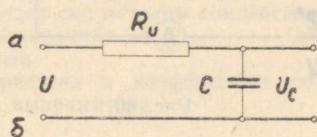


Рис. 39.

При достаточно больших величинах сопротивления R_u и емкости C напряжение на емкости U_c значительно меньше напряжения U_i на клеммах измерительной катушки аб ($U_c \ll U_i$); поэтому

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t I dt = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{U_i - U_c}{R} dt \approx \frac{1}{RC} \int_0^t U_i dt.$$

Пренебрегая незначительным падением напряжения в обмотке измерительной катушки 2 (рис. 40), принимаем, что напряжение U_i на клеммах аб равно электродвижущей силе, индуцируемой в обмотке 2, т. е.

$$U_i = \frac{n_2}{c} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Поэтому можно считать, что $\int U_i dt$ и следовательно напряжение U_c на конденсаторе пропорциональным индукции B в исследуемом образце.

Напряжение U_c подается на одну пару пластин катодного осциллографа. Если на эти пластины подать прямо (помимо ин-

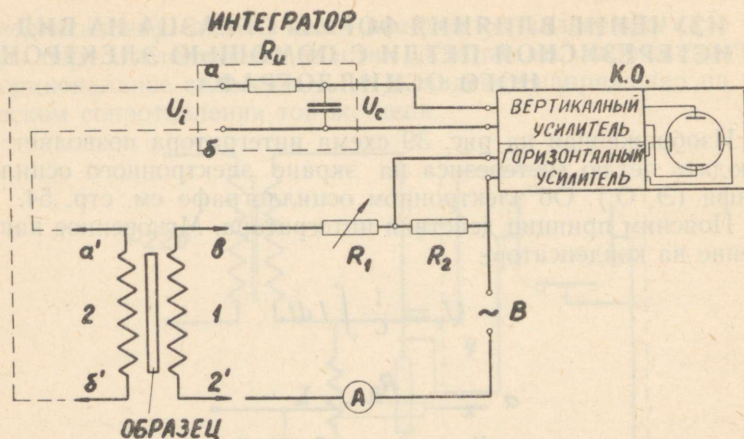


Рис. 40.

тегратора) напряжение с клемм аб, то оно будет пропорционально не индукции B , а величине $\frac{dB}{dt}$. К другой паре пластин осциллографа подводится напряжение, снимаемое с небольшого сопротивления R_2 (около 5 ом), включенного в намагничивающую цепь схемы (рис. 40). Это напряжение пропорционально силе тока и, следовательно, напряженности магнитного поля, действующего на исследуемый образец.

Интегратор смонтирован, и выводы его подключены к вертикальному усилителю осциллографа.

Наблюдения. Собирают схему по рис. 40, вкладывают наибольший образец в соленоид и включают переменный ток в намагничивающую катушку (более толстая обмотка). Реостатом устанавливают величину тока в 1,0 ампер и включают ток в осциллограф. Регулируют величину фигуры до максимальной возможной величины и зарисовывают петлю гистерезиса вместе с осевыми линиями экрана. Не меняя регулировки осциллографа, устанавливают ток в 0,5 а и 0,1 ампер и зарисовывают обе фигуры.

При этих же значениях токов зарисовывают гистерезисные петли для других образцов. Полученные гистерезисные петли сравнивают друг с другом и выясняют причины изменения их формы.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
О погрешностях измерений	3
Характеристика лампы накаливания	11
Определение коэффициента полезного действия электрического кипя- тильника	14
Определение сопротивления мостиком Уитстона	16
Определение малых сопротивлений при помощи мостика Томсона	19
Мегомметр	24
Измерение емкости конденсаторов при помощи моста переменного тока	28
Сравнение электродвижущих сил методом компенсации	31
Калибровка тангенс-гальванометра	34
Калибровка термоэлемента	38
Вольтамперная характеристика и коэффициент полезного действия полупроводникового выпрямителя	43
Характеристика триода	47
Изучение работы катодного осциллографа	54
Изучение влияния формы образца на вид гистерезисной петли с по- мощью электронного осциллографа	65

Г. А. Метс, К. Я. Шульц и Л. А. Юуль
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ II
Таллинский Политехнический Институт

*

Редактор Г. А. Метс
Технический редактор А. Тамм
Корректор Ы. Каар

Сдано в набор 27 VIII 1960. Подписано к печати 14 XI 1960. Бумага 60×92.
Печатных листов 4.25 Учетно-издательских листов 2.85. Тираж 1500.
МВ-08324. Заказ № 6189. Типография «Ксмунист», Таллин ул. Пикк 2.

Бесплатно

ARH
1A-5245

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00465348 3