

- Почему нежелательно наличие в пространстве между пластинами конденсатора капелек с большим зарядом?
- Каков элементарный заряд в системах СИ и СГСЕ?

Литература

- Матвеев/ А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
- Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель настоящей лабораторной работы заключается в изучении *компенсационных методов* измерения электродвижущих сил, токов и сопротивлений и в применении этих методов к некоторым конкретным случаям.

Метод компенсации является в настоящее время одним из основных приемов точных лабораторных электрических измерений.

Метод компенсации

Сущность метода можно понять, анализируя принципиальную схему измерений, изображенную на рис. 1. В этой схеме \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 — источники ЭДС с внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 , R_1 и R_2 — соответственно сопротивления участков цепи AB и BC . Обратим внимание на то, что источники электродвижущих сил соединены друг с другом одноименными полюсами. Обозначим через r_3 сопротивление подводящих проводов от элемента \mathcal{E}_1 и через r_4 — сопротивление подводящих проводов от элемента \mathcal{E}_2 . Токи, идущие в отдельных участках схемы, обозначим I , I_1 и I_4 .

Рассмотрим условия, в которых сила тока I_2 в цепи элемента \mathcal{E}_2 и гальванометра G будет равна нулю. Для этого напишем уравнения первого и второго законов Кирхгофа. Для разветвления токов в точке A имеем

$$I_1 = I + I_2.$$

Для контуров $\mathcal{E}_1 ABC \mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2 AB \mathcal{E}_2$ можем написать

$$I_1 R_1 + I(R_2 + r_1 + r_3) = \mathcal{E}_1, \quad I_1 R_1 + I_2(r_2 + r_4) = \mathcal{E}_2.$$

Решая совместно написанные уравнения при условии, что сила тока в цепи элемента \mathcal{E}_2 равна нулю ($I_2 = 0$), находим, что это будет иметь место, когда

$$\mathcal{E}_2 = I_1 R_1 = \frac{\mathcal{E}_1 R_1}{r_1 + r_3 + R_1 + R_2}. \quad (1)$$

Полученное условие означает, что сила тока в цепи элемента \mathcal{E}_2 равна нулю в том случае, когда падение напряжения на участке цепи AB , параллельно которому присоединен элемент \mathcal{E}_2 , равно электродвижущей силе этого элемента, т. е. компенсирует его.

От слова «компенсация» и получил свое название метод измерений, называемый *компенсационным*. Сущность его будет разъясняться ниже.

Если вместо элемента \mathcal{E}_2 ввести другой элемент \mathcal{E}_3 и вновь добиться отсутствия тока в цепи гальванометра и этого элемента (сохраняя неизменным значение общего сопротивления контура $\mathcal{E}_1 ABC \mathcal{E}_1$), то сопротивление участка цепи AB будет равно некоторому значению R_1' . Теперь будет иметь силу равенство

$$\mathcal{E}_3 = \frac{\mathcal{E}_1 R_1'}{r_1 + r_3 + R}. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) легко находим

$$\frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} = \frac{R_1'}{R_1}.$$

Если электродвижущая сила элемента \mathcal{E}_2 известна; например, если это нормальный элемент, имеющий электродвижущую силу \mathcal{E}_N ; то, зная R_1 и R_1' , мы можем из последнего равенства определить электродвижущую силу элемента \mathcal{E}_2 . Таким образом, сравнение электродвижущих сил двух элементов может быть практически сведено к сравнению двух сопротивлений, использованных при компенсационных измерениях.

Метод компенсации для измерений электродвижущих сил обладает рядом существенных достоинств. Во-первых, сила тока через элементы, электродвижущие силы которых сравниваются между собой, близка к нулю. Поэтому падения напряжения внутри элемента, снижающего значение измеренной на полюсах элемента разности потенциалов, практически нет. В этом методе ток через элемент при использовании чувствительного зеркального гальванометра может быть уменьшен до значения 10^{-9} – 10^{-10} А. Соответственно не играет также роли и падение напряжения в проводах, соединяющих элемент с измерительной схемой. Во-вторых, при компенсационном методе измерений гальванометр работает как нулевой прибор, и градуировка его шкалы в результате измерений не входит. Сопротивления, входящие в окончательное выражение, могут быть в настоящее время измерены с точностью до сотых долей процента. Наконец, величина электродвижущей силы вспомогательной батареи \mathcal{E}_1 также не входит в окончательный результат. Необходимо лишь, чтобы значение ее электродвижущей силы во время измерений было постоянным, кроме того, электродвижущая сила должна превышать электродвижущие силы сравниваемых элементов. Такую роль может с успехом выполнять батарея аккумуляторов.

Компенсационный метод измерения электродвижущих сил используется, в частности, для измерения электродвижущих сил термоэлементов, применяемых для измерения температуры. Метод компенсации позволяет достигать точности до 0,03% от измеряемой величины.

Описание экспериментальной установки

Практически описанный метод в простейшем варианте реализуется так, как это показано на рис. 2. В изображенной схеме \mathcal{E}_1 — батарея аккумуляторов, R_1 и R_2 — два штепсельных магазина сопротивлений P-14 по 1111 Ом каждый, R — курбельный магазин сопротивлений на 9999,9 Ом, \mathcal{E}_N — нормальный элемент Вестона с известной электродвижущей силой (она указана в паспорте элемента, находящемся на установке), G — гальванометр, служащий индикатором отсутствия тока через элемент \mathcal{E}_2 в момент компенсации его ЭДС, S_1 — двойной ключ, замыкающий сна-

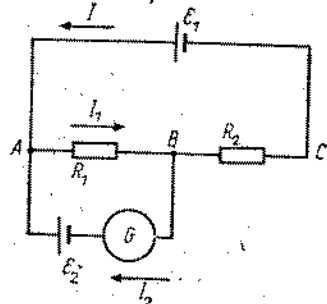


Рис. 1. Принципиальная схема установки

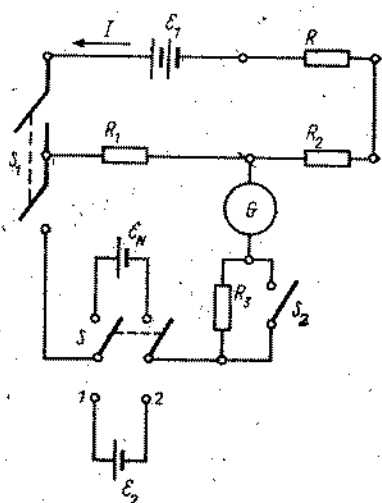


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

чала цепь вспомогательной батареи \mathcal{E}_1 , а затем цепь гальванометра и исследуемого (или нормального) элемента, R_3 — постоянное вспомогательное сопротивление, служащее для уменьшения тока в цепи гальванометра при предварительной, грубой компенсации, S_2 — однополюсный ключ, служащий для замыкания коротко этого сопротивления при точной компенсации, S — двухполюсный перекидной рубильник, позволяющий включать в схему поочередно нормальный или исследуемый элемент.

Если путем изменения сопротивлений R_1 и R_2 , включенных в схему, достигнута компенсация, т. е. сила тока через исследуемый элемент и через гальванометр равна нулю, то согласно изложенному выше имеет место равенство $\mathcal{E}_2 = IR_1$. Следовательно, для определения электродвижущей силы исследуемого элемента нужно знать величину рабочего тока I , идущего через сопротивление R_1 , при котором наступает компенсация. Если установить ток равным 0,001 А, то значение искомой электродвижущей силы запишется в виде $\mathcal{E}_2 = 0,001 R_1$ В. Для получения определенного значения рабочего тока 0,001 А служат нормальный элемент \mathcal{E}_N и

переменное сопротивление R . Указанный способ осуществления компенсационного метода может показаться отличным от описанного выше принципа подобных измерений. Однако, как будет видно дальше, практически он сводится к тому же самому.

Установление рабочего тока. Установление рабочего тока силой в 0,001 А производится в два этапа. Сначала, зная по паспорту электродвижущую силу нормального элемента, устанавливают по расчету такое сопротивление R_1 (в магазине, включенном параллельно нормальному элементу), чтобы \mathcal{E}_N/R_1 было равно 0,001 А.

Полное сопротивление каждого магазина P-14 составляет 1111 Ом. Сопротивления по 4, 3 и 2 кОм в магазинах вообще не используются, и штырьки в их гнездах остаются все время вставленными. Перед началом работы необходимо только проверить, насколько плотно они вставлены. Это указание относится также и ко всем другим штырькам неработающих сопротивлений. Следовательно, в каждом магазине привлекаются к работе сопротивления только из 2111 Ом, имеющиеся в каждом магазине сверх 9000 Ом, но и эти сопротивления включаются не полностью (см. ниже).

Итак, после того как установлено нужное значение сопротивления R_1 , включают во втором магазине сопротивления все те катушки, которые остались невключенными в первом магазине. Таким образом, сумма сопротивлений R_1 и R_2 , включенных в обоих магазинах, составляет вместе 2111 Ом. Эта сумма сопротивлений $R_1 + R_2$ должна оставаться в дальнейшем все время постоянной.

После этого переходят к фактическому установлению в схеме нужного рабочего тока от аккумуляторной батареи. Это делается с помощью курбельного магазина R (см. рис. 2). (Мы не останавливаемся здесь на описании способа работы с этим магазином, так как он вполне очевиден: нужные сопротивления включаются посредством вращений ручек курбелей, устанавливаемых против соответствующих стрелок.)

Для установления рабочего тока, учитывая сопротивление 2111 Ом, включенное в двух штепсельных магазинах, и ориентировочное значение электродвижущей силы батареи (из расчета 1,3 В на одну банку щелочного аккумулятора), устанавливают в курбельном магазине такое сопротивление R , чтобы приблизительно имело место равенство

$$\frac{\mathcal{E}_1}{R + 2111} = 0,001 \text{ А.}$$

После этого, установив перекидной рубильник в такое положение, чтобы к схеме был присоединен нормальный элемент, размыкают ключ S_2 и замыкают на короткое время двойной ключ S_1 , наблюдая за показаниями гальванометра. Стрелка гальванометра даст какое-то отклонение. Тогда, изменяя сопротивление, включенное в курбельном магазине, и нажимая на короткое время на двойной ключ, добиваются отсутствия тока через гальванометр. Когда от-

клонения стрелки гальванометра перестанут быть заметными, замыкают накоротко ключом S_2 предохранительное сопротивление гальванометра и вновь добиваются отсутствия тока через гальванометр в условиях возросшей чувствительности измерительной схемы.

Когда поставленное требование отсутствия тока в цепи гальванометра и нормального элемента выполнено, в цепи штепсельных магазинов действительно установлен рабочий ток силой в $0,001$ А.

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Разомкнуть ключ S_2 и с помощью перекидного рубильника S присоединить к схеме элемент с неизвестным значением электродвижущей силы.

Теперь при нажиме на двойной ключ S_1 можно будет опять наблюдать отклонения стрелки гальванометра, так как электродвижущая сила включенного исследуемого элемента не будет скомпенсирована. Изменяя значения сопротивлений R_1 и R_2 в обоих штепсельных магазинах, но так, чтобы их сумма оставалась всегда постоянной и равной 2111 Ом, снова добиваются компенсации, т. е. отсутствия тока в цепи гальванометра. Это делают сначала при разомкнутом ключе S_2 , а затем окончательно при замкнутом ключе S_2 . Разумеется, что при всех этих операциях значение сопротивления R , включенного в курбельном магазине, остается все время постоянным.

Для соблюдения обязательного условия сохранения постоянства суммы двух сопротивлений R_1 и R_2 надо придерживаться следующего правила работы: каждый штырек, вынимаемый при компенсации измеряемого напряжения из рабочего гнезда одного магазина, немедленно вставляется в гнездо, отмеченное той же цифрой, второго магазина. Это гнездо во втором магазине будет обязательно свободным в силу принятого первоначального способа включения сопротивлений в обоих магазинах. Таким образом, автоматически будет сохраняться требуемое постоянство суммы $R_1 + R_2$.

Когда компенсация будет достигнута, значение электродвижущей силы исследуемого элемента может быть найдено из условия

$$\mathcal{E}_2 = 0,001 R_1,$$

где R_1 — сопротивление магазина, включенного в цепь параллельно исследуемому элементу. В самом деле, в процессе компенсации сумма значений всех сопротивлений $R_1 + R_2 + R$ в цепи вспомогательной батареи оставалась неизменной, следовательно, рабочий ток сохранил свое значение, установленное с помощью нормального элемента.

Надо отметить, что в настоящей работе демонстрируется общий принцип компенсационных измерений, и только поэтому используются три отдельных магазина сопротивлений. Практически

в лабораторных работах применяются комбинированные магазины сопротивлений, смонтированные вместе со всеми ключами, а нередко и с гальванометром. Такие установки носят название потенциометров. В потенциометрах обычно имеется отдельный магазин, соответствующий нашему курбельному магазину R , для установления рабочего тока. В качестве двух штепсельных магазинов используются также курбельные магазины. Вращающиеся ручки этих магазинов так соединены между собой, что условие постоянства суммы $R_1 + R_2$ (при изменениях R_1) автоматически выполняется: всякое сопротивление, введенное в одном магазине, одновременно автоматически выключается в другом магазине.

Измерения электродвижущей силы исследуемого элемента произвести два раза, меняя между собой ролями штепсельные магазины при неизменной общей измерительной схеме.

Упражнение 2. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА

Принцип осуществляемых в настоящем упражнении измерений легко понять на основании всего изложенного выше и рис. 3.

Пусть надо измерить силу тока в контуре батареи \mathcal{E}_1 . В таком случае в этот контур кроме необходимых для работы приборов (в нашем случае это батарея аккумуляторов \mathcal{E}_1 , переменное сопротивление R , балластное сопротивление R_x , градуируемый миллиамперметр mA) включено еще специально для измерительных целей *эталонное* (или, иначе, *нормальное*) сопротивление R_N . Величина этого сопротивления заранее надежно измерена. Если мы будем знать величину падения напряжения U_N на нормальном сопротивлении, то из соотношений $U_N = IR_N$ можно найти искомую величину силы тока в контуре батареи \mathcal{E}_1 . Следовательно, задача сводится к измерению величины U_N . Но способ измерения U_N нам уже известен из предыдущего упражнения. Именно, присоединяя к клеммам 1 и 2 (рис. 2) перекидного рубильника вместо исследуемого элемента провода от клемм 1 и 2 *эталонного* сопротивления (см. рис. 3), мы можем измерить величину U_N так же, как измеряли раньше электродвижущую силу.

Надо только, разумеется, правильно задать полярность аккумуляторной батареи в том новом контуре, в котором измеряется сила тока. В противном случае компенсация падения напряжения на *эталонном* сопротивлении окажется невозможной. Компенсацию необходимо сначала вести при разомкнутом ключе S_2 в схеме рис. 2, а затем при замкнутом ключе.

В данном упражнении компенсационные измерения силы тока используются для градуировки некоторого миллиамперметра. По-

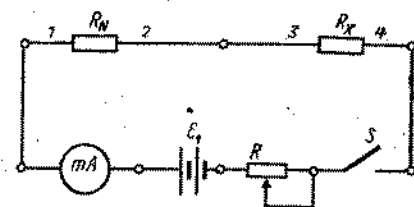


Рис. 3. Схема установки при измерении силы тока

этому в той цепи, в которой измеряется сила тока, кроме постоянного балластного сопротивления R_x имеются еще переменное сопротивление R и миллиамперметр. Переменное сопротивление позволяет устанавливать последовательно по этапам различные значения силы тока, текущего через миллиамперметр, постепенно проходя всю его шкалу. Каждое установленное значение силы тока измеряется компенсационным методом.

По результатам работы следует построить калибровочный график миллиамперметра, выражающий зависимость показаний этого прибора от силы протекающего через него тока. На основании этого графика надо найти среднее значение цены деления шкалы прибора, выраженное в миллиамперах.

Упражнение 3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Компенсационный метод измерения сопротивлений является дальнейшим развитием описанного выше метода измерения силы тока.

Пусть мы хотим найти значение балластного сопротивления R_x в нашей схеме рис. 3. Так как это сопротивление включено последовательно с R , то через оба сопротивления идет ток одной и той же силы. Исходя из этого, легко написать, что $U_N = IR_N$ и $U_x = IR_x$, где U_N и U_x — соответственно значения падений напряжения на эталонном и балластном сопротивлениях. Следовательно, если мы измерим тем же компенсационным методом величины U_N и U_x , то, зная R_N , мы можем найти

$$R_x = R_N \frac{U_x}{U_N}.$$

Для этого надо к клеммам перекидного рубильника 1 и 2 (см. рис. 2) присоединить поочередно провода от клемм балластного и эталонного сопротивлений (см. рис. 3) и обычным путем измерить с помощью компенсационной схемы величины U_x и U_N . Измерения надо сделать при нескольких значениях силы тока в цепи, варьируя в ней сопротивление R так же, как это делалось при градуировке миллиамперметра. Измерения надо начинать всегда при разомкнутом и заканчивать при замкнутом ключе S_2 (см. рис. 2). В конце работы надо оценить точность сделанных измерений сопротивления.

В заключение необходимо отметить особые преимущества компенсационного метода измерения сопротивлений перед другими способами. При этом способе измерений на результате не сказывается сопротивление подводных проводов. Существенно также и то, что значение силы тока, идущего через измеряемое и эталонное сопротивления, также никак не входит в конечный результат. Сила тока может иметь совершенно произвольное значение в пределах нагрузок, допустимых для сопротивлений данной конструкции. Кроме того, сила тока должна быть постоянна только в течение времени, достаточного для измерения величин U_N и U_x .

Как показывает ближайшее рассмотрение, компенсационный метод позволяет также полностью исключить влияние паразитных термоэлектродвижущих сил, легко возникающих во всех контактах цепи. Для этого требуется лишь добавление в схему специальных инверсионных переключателей у источников электродвижущих сил, включенных в схему. В настоящей работе мы ими не пользовались, чтобы не затруднять понимание принципиальной стороны.

Компенсационный метод является основным точным лабораторным приемом измерения сопротивлений и используется, в частности, для обслуживания таких важных приборов для измерения температуры, как термометры сопротивления. Метод позволяет при наилучших условиях измерений доводить их точность до сотых долей процента измеряемой величины.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему метод, используемый при измерениях в данной работе, называется компенсационным?
2. Какими существенными достоинствами обладает данный метод в сравнении с другими?
3. Нарисовать электрическую схему измерительной установки. Объяснить порядок действий, выполняемых при измерениях.
4. В чем состоит назначение двойного ключа S_1 ?
5. Каким образом в схеме устанавливается нужное значение рабочего тока?
6. С какой целью общее сопротивление в цепи вспомогательной батареи поддерживается постоянным?
7. Какова точность выполненных измерений? Какие факторы ее ограничивают?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 5

ГАЛЬВАНОМЕТР МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Изучаются устройство и принцип действия гальванометра магнитоэлектрической системы, измеряются его параметры: чувствительность по току и напряжению, период свободных колебаний рамки гальванометра, величина внешнего критического сопротивления, декремент затухания колебаний рамки.

Устройство и принцип действия гальванометра. Гальванометры — приборы, служащие для измерения слабых электрических токов — подразделяются по своей конструкции на две основные группы: 1) с подвижной катушкой, обтекаемой током и вращающейся в поле неподвижного магнита или электромагнита; 2) с подвижным магнитом и неподвижной катушкой.