

Измерение ЭДС компенсационным методом: Описание к лабораторной работе / Сост. В.Д. Пикулин. Н. Новгород: ННГУ, 2004. 11 с.

Описание предназначено для студентов радиофизического факультета, выполняющих работы в лабораториях общего практикума кафедры общей физики.

Рис. 4. Библиогр. назв. 2.

Составитель В. Д. Пикулин

Редакторы М. И. Бакунов, С. Б. Бирагов

Рецензент Л. А. Кондраченко

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Стационарный электрический ток в замкнутой цепи может существовать благодаря источникам тока, в которых на заряженные частицы (носители тока) действуют сторонние непотенциальные силы $\vec{F}^{\text{ст}}$. Электродвижущей силой (ЭДС) на участке цепи 1-2 называется работа сторонней силы, совершаемая при перемещении по этому участку единичного положительного заряда:

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 E_{\ell}^{\text{ст}} d\ell, \quad (1)$$

где $\vec{E}^{\text{ст}}$ — напряженность поля сторонних сил (отношение сторонней силы к заряду носителя тока).

Сторонние силы могут иметь различную природу. Так, например, в химических источниках тока стороннее силовое поле возникает в тонких контактных слоях между электродами и электролитом.

Под действием сторонних сил может происходить разделение зарядов, в результате чего возникает кулоновское (электростатическое) поле $\vec{E}^{\text{к}}$. Работа, совершаемая кулоновской силой при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2, есть разность потенциалов между этими точками:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_{\ell}^{\text{к}} d\ell. \quad (2)$$

Кроме сторонних и кулоновских сил на носители тока в проводниках действуют силы сопротивления, подобные силам вязкого трения и пропорциональные скорости упорядоченного движения зарядов. Работа этих сил отрицательна, а ее величина, отнесенная к единичному заряду, численно равна произведению силы тока I на сопротивление участка цепи R_{12} . Поскольку алгебраическая сумма работ кулоновских, сторонних сил и сил сопротивления равна нулю (заряды движутся равномерно), то на любом участке цепи выполняется закон Ома

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (3)$$

ИЗМЕРЕНИЕ ЭДС ПРИ ПОМОЩИ ВОЛЬТМЕТРА

При подключении вольтметра с сопротивлением R_v к батарее, имеющей ЭДС \mathcal{E} и внутреннее сопротивление r (рис. 1),

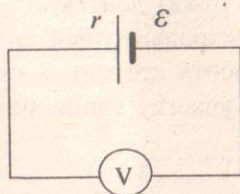


Рис. 1. Измерение ЭДС при помощи вольтметра.

показания вольтметра будут пропорциональны протекающему в цепи току I :

$$U = IR_v = \frac{\mathcal{E}R_v}{R_v + r}. \quad (4)$$

Как следует из (4), показания вольтметра отличаются от значения \mathcal{E} на величину

$$\mathcal{E} - U = Ir = \frac{\mathcal{E}r}{R_v + r}. \quad (5)$$

При $R_v \gg r$ относительная ошибка измерения ЭДС $\delta\mathcal{E}$ становится малой и примерно равна

$$\delta\mathcal{E} \approx \frac{r}{R_v}. \quad (6)$$

Данная ошибка, связанная с методом измерения ЭДС, для высокоомного (например, цифрового) вольтметра может быть меньше ошибки, определяемой точностью прибора. При использовании же не слишком высокоомных вольтметров, например, магнитоэлектрических или электромагнитных, измерение по указанной схеме дает заметную ошибку. Более точное измерение обеспечивает использование метода компенсации.

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ

Для пояснения идеи метода компенсации рассмотрим схему, приведенную на рис. 2.

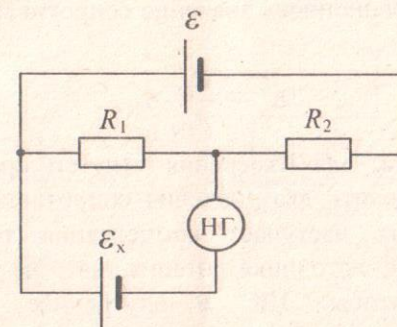


Рис. 2. Принципиальная схема измерения ЭДС методом компенсации.

Здесь \mathcal{E}_x - неизвестная ЭДС, которую требуется измерить, а \mathcal{E} - ЭДС источника питания ($\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$). Методика измерения состоит в том, чтобы, подбирая сопротивление R_1 при неизменной сумме

$$R_1 + R_2 = R = \text{const}, \quad (7)$$

добиться обращения в нуль тока через нульгальванометр (НГ), т.е. компенсации токов, создаваемых ЭДС \mathcal{E}_x и \mathcal{E} . Записывая ток через гальванометр с помощью правил Кирхгофа (или методом контурных токов)

$$I_g = \frac{\mathcal{E}R_1 - \mathcal{E}_x R}{rR + R_1 R_2}, \quad (8)$$

из условия компенсации $I_g = 0$ выражаем неизвестную ЭДС:

$$\mathcal{E}_x = \frac{R_{1x}}{R} \mathcal{E}, \quad (9)$$

где R_{1x} - значение R_1 , при котором $I_g = 0$. Для нахождения \mathcal{E}_x требуется знать точное значение ЭДС \mathcal{E} . Чтобы исключить эту ЭДС из расчетов, проводится еще одно измерение - в эту же схему вместо \mathcal{E}_x включают эталонную ЭДС \mathcal{E}_N (обычно ртутно-кадмиевый нормальный элемент Вестона) и, подбирая R_1 , вновь

добиваются компенсации. Условие компенсации в этом случае имеет вид

$$\mathcal{E}_N = \frac{R_{IN}}{R} \mathcal{E}, \quad (10)$$

где R_{IN} — «компенсационное» значение сопротивления R_1 . Из (9), (10) находим

$$\mathcal{E}_x = \frac{R_{IX}}{R_{IN}} \mathcal{E}_N. \quad (11)$$

Таким образом, для измерения (путем сравнения с \mathcal{E}_N) необходимо определить два значения сопротивления R_1 (R_{IX} и R_{IN}), при которых наступает компенсация токов в ветви гальванометра. ЭДС источника питания знать не требуется, достаточно лишь, чтобы ЭДС и внутреннее сопротивление источника оставались стабильными в течение времени подбора сопротивлений R_{IX} и R_{IN} .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Рабочая схема для измерения ЭДС аккумулятора методом компенсации приведена на рис. 3.

В качестве источника питания в работе используется стандартный блок питания БП-28, а в качестве эталонной ЭДС — нормальный элемент типа НЭ-65 класса 0,005. Резисторы R_1 и R_2 представляют собой два одинаковых штепсельных магазина. Постоянную сумму сопротивлений $R = R_1 + R_2$ этих магазинов удобно выбрать равной максимальному сопротивлению одного из них. Чтобы при варьировании R_1 обеспечить постоянство суммы $R_1 + R_2$, следует, вынимая штепсель из гнезда одного магазина, вставлять его в идентичное гнездо другого.

Защитный резистор R_3 предохраняет нормальный элемент и нульгальванометр от недопустимо больших токов в отсутствие компенсации. Перед началом каждого измерения R_3 вводят в цепь полностью, а по мере приближения к точке компенсации уменьшают до нуля для увеличения чувствительности схемы.

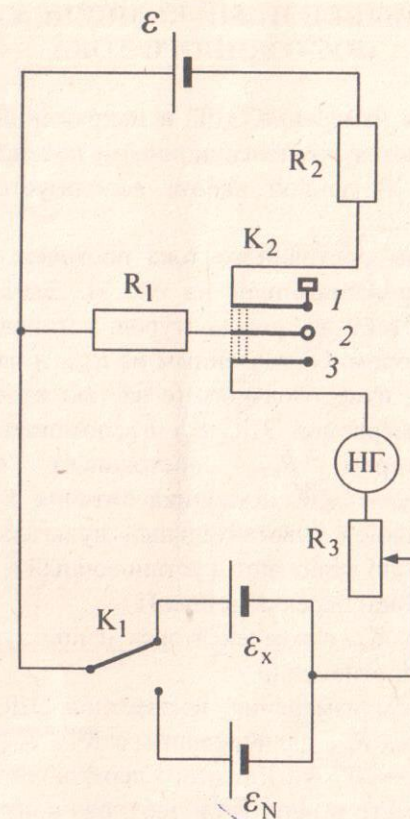


Рис. 3. Рабочая схема для определения ЭДС методом компенсации.

Схема включается на короткое время с помощью двойного пружинного ключа K_2 . Чтобы предохранить нульгальванометр и нормальный элемент от перегрузок, а также исключить влияние индукционных токов, при нажатии кнопки ключа K_2 сначала замыкается (через контакты 1 и 2) цепь источника питания и лишь после этого подключается (через контакты 2 и 3) ветвь с \mathcal{E}_x или \mathcal{E}_N . Такая последовательность включения особенно важна при наибольшей чувствительности схемы, когда $R_3 \approx 0$.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЕНСАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

Приборы для измерения ЭДС и напряжений методом компенсации называются компенсационными потенциометрами или компенсаторами. В данной работе используется компенсатор Р307.

Компенсаторы постоянного тока построены по принципиальной схеме, представленной на рис. 4. Электрическая цепь компенсатора состоит из трех контуров: установочного (с установочным резистором, составленным из $R_{уст1}$ и части $R_{уст2}$, и эталонной ЭДС \mathcal{E}_N), измерительного (с частью измерительного резистора $R_{изм}$ и измеряемой ЭДС \mathcal{E}_x) и вспомогательного (с изменяемым резистором $R_{всп}$, постоянным сопротивлением $R_{уст1} + R_{уст2} + R_{изм}$ и ЭДС источника питания \mathcal{E}). Индикатором компенсации является чувствительный нульгальванометр (НГ), который поочередно включают в установочный и измерительный контуры при помощи переключателя П.

В качестве $R_{изм}$ и $R_{всп}$ в компенсаторах используют многодекадные магазины сопротивлений.

Перед началом измерения неизвестной ЭДС обеспечивают прохождение через $R_{изм}$ калиброванного тока I_0 (в высокоомных компенсаторах $I_0 = 10^{-4}$ А). Для этого переключателем П включают нульгальванометр в цепь установочного контура и, подбирая $R_{всп}$, добиваются компенсации в установочном контуре. При этом во вспомогательном контуре (в том числе через $R_{всп}$) будет протекать ток $I_0 = 10^{-4}$ А, если $\mathcal{E}_N = 1,018$ В, $R_{уст1} = 10180$ Ом и $R_{уст2} = 0$. Небольшие отклонения \mathcal{E}_N от значения 1,018 В, связанные с изменением температуры t °С, учитываются варьированием $R_{уст2}$ (в пределах от 0 до 9 Ом). На лимбе этого резистора, выполненного в виде отдельной температурной декады, выставляется значение \mathcal{E}_N , взятое из эмпирической формулы

$$\mathcal{E}_N = \mathcal{E}_{N20} - [40,6(t - 20) + 0,95(t - 20)^2] 10^{-6}, \quad (12)$$

где \mathcal{E}_{N20} — паспортное значение ЭДС при $t = 20^\circ\text{C}$.

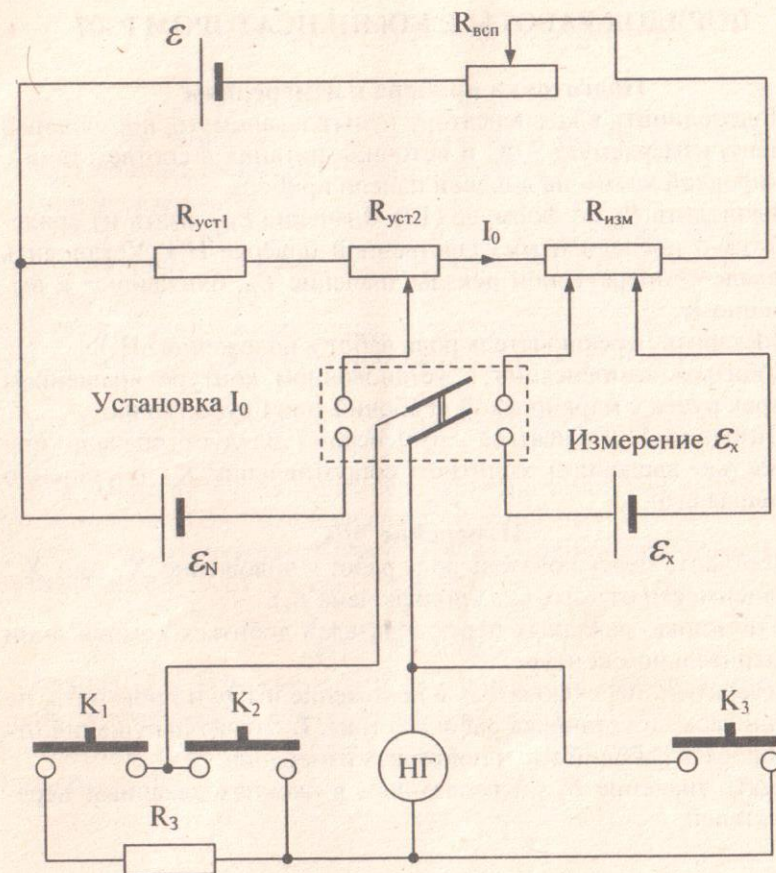


Рис. 4. Принципиальная схема компенсатора.

ПОРЯДОК РАБОТЫ С КОМПЕНСАТОРОМ Р307

Подготовка прибора к измерениям

1. Подсоединить к компенсатору нульгальванометр, нормальный элемент, измеряемую ЭДС и источник питания в соответствии с маркировкой клемм на лицевой панели прибора.
2. Вычислить \mathcal{E}_N по формуле (12). Значение \mathcal{E}_{N20} взять из свидетельства о последней государственной поверке НЭ. Установить на шкале температурной декады значение \mathcal{E}_N , ближайшее к вычисленному.
3. Поставить переключатель рода работ в положение «НЭ».
4. Добиться компенсации в установочном контуре вращением четырех ручек с маркировкой «Рабочий ток. Грубо. Точно».

Внимание! Добиваться компенсации следует сначала при полностью введенном защитном сопротивлении R_3 , постепенно уменьшая его.

Измерение ЭДС

1. Поставить переключатель рода работ в положение X_1 или X_2 (в зависимости от того, куда подключена \mathcal{E}_x).
2. С помощью декадных переключателей добиться компенсации в измерительном контуре.
3. Возвратить переключатель в положение «НЭ» и проверить, не нарушилась ли установка рабочего тока. В случае нарушения откалибровать рабочий ток и повторить измерение.
4. Снять значение \mathcal{E}_x по показаниям в окнах декадных переключателей.

ЗАДАНИЕ

1. Ознакомьтесь с характеристиками и правилами использования нормального элемента типа НЭ-65. Рассчитайте величину защитного сопротивления R_3 в схеме рис. 3 в наиболее неблагоприятном случае.
2. Измерьте \mathcal{E}_x с помощью вольтметра.
3. Соберите схему, изображенную на рис. 3, и измерьте \mathcal{E}_x методом компенсации. Перед измерениями целесообразно оценить R_{1x} и R_{1N} .
4. Измерьте \mathcal{E}_x с помощью промышленного компенсатора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Постройте качественный график зависимости относительной погрешности измерения ЭДС вольтметром от отношения внутреннего сопротивления источника и вольтметра.
2. Получите формулу (8).
3. Может ли разность потенциалов между полюсами источника тока, включенного в электрическую цепь, быть больше его ЭДС? Равна нулю?
4. Укажите направления токов, вызванных каждым источником в отдельности и обоими источниками вместе во всех ветвях схемы рис. 2.
5. Постройте качественный график зависимости тока через гальванометр от сопротивления R_1 .
6. Как зависит чувствительность компенсационных измерений по схеме на рис. 3 от величины вспомогательной ЭДС \mathcal{E} ?
7. Как зависит чувствительность компенсационных измерений по схеме на рис. 3 от суммы $R_1 + R_2 = R$?

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов П.Б. Измерение ЭДС и напряжений методом компенсации. Методическая разработка. Горький: ГГУ, 1979.
2. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Т. 3. Электричество. М.: Физматлит, 2002.